

# COMUNICACIONES OPTICAS

JOSE ANTONIO MARTIN PEREDA

Universidad Politécnica de Madrid

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicación

Ciudad Universitaria

MADRID

## I. COMUNICACIONES OPTICAS

### 1. INTRODUCCION

#### a) Puntos básicos

Nos vamos a centrar principalmente en dos puntos de vista diferentes:

- El primero está centrado alrededor de los componentes.
- El segundo nos da una idea de la integración de estos componentes en los sistemas.

La base de las comunicaciones ópticas la podemos encontrar en la física óptica clásica.

#### b) Situación actual del mercado

El mercado de las comunicaciones ópticas mundial en 1986 fue de 750 M\$, se divide esencialmente en 5 ámbitos.

- Las telecomunicaciones abarcan el 70 % del mercado de las fibras ópticas.

Este mercado se divide a su vez en tres tipos:

1) Larga distancia de la cual se espera un crecimiento moderado en el futuro, aunque en 1985 se montaron 300.000 Km. de fibra y en 1986 400.000 Km.

2) Interconexión entre es el principal consumidor actualmente y se espera un crecimiento de un 20 % por un año durante los próximos 10 años.

3) Breda de abonado. Se extendieron durante el año 1986 de 29.000 a 32.000 Km. de fibra. Este mercado tiene buenas perspectivas para el futuro, estimándose un incremento del 30 % para los próximos años.

- La TV por cable.

No parece tener un gran mercado y su crecimiento será más bien exiguo.

- Defensa.

Las aplicaciones de las comunicaciones ópticas en cuanto a la defensa se refiere son análogas a las civiles. El crecimiento estimado es del 10 %. Este bloque está consumiendo el 20 % del total de fibras.

- Industria del Automóvil.

Se espera un mercado de 460M\$ por año a mediados de los 90. Una aplicación clásica en el futuro próximo serán los paneles de control de luces.

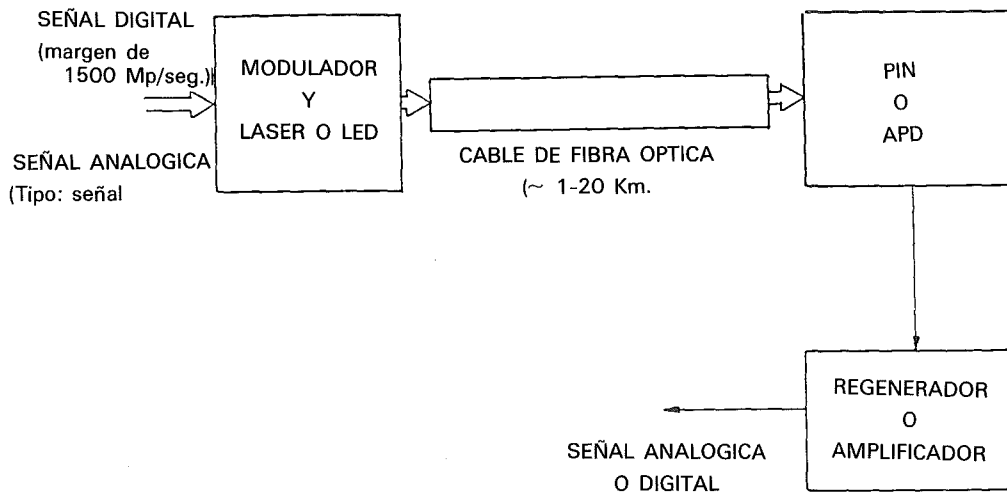
— Sanidad.

Será utilizada la técnica para transmitir imágenes de dentro del cuerpo (endoscopia).

Se espera que para el año 2000 haya un crecimiento considerable de prestaciones y demanda.

### c) Bloques básicos de un sistema de comunicaciones

Las diferencias con los demás sistemas de comunicaciones convencionales se presentan en el emisor de la radiación, el medio de transmisión y el receptor.



Nota: El regenerador o el amplificador se espera que en un futuro tengan también tecnología propia.

## 2. FIBRAS OPTICAS

### a) Parámetros atractivos de las fibras ópticas

- Pequeñas pérdidas y gran ancho de banda.
- Pequeño tamaño.
- No conductoras, no radiantes, no conductivas.
- Ligeras de peso.

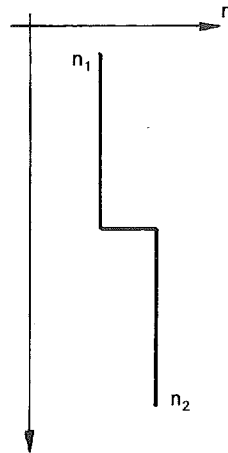
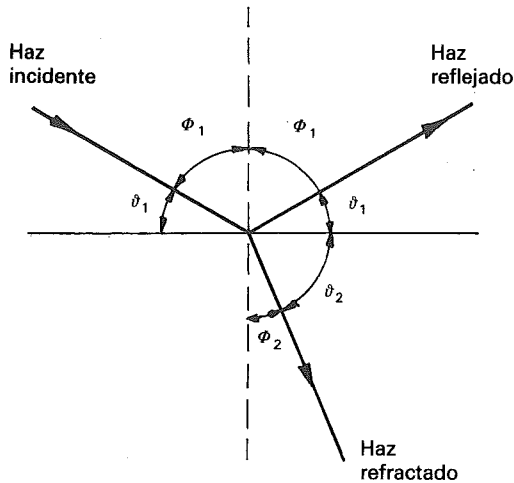
— No permite crecimiento según demanda. Con aumento de demanda hay que modificar la entrada y la salida, la fibra no sigue sirviendo.

Sistemas de transmisión óptica con diversos componentes ópticos

Fibra	LED				LASER			
	Multimodo salto de índice	Multimodo índice gradual			Multimodo salto de índice	Multimodo índice gradual		Monomodo
Tipo de Modulación	Analógica	Analógico- Digital			Analógico-Digital	Analógico-Digital		Digital
Detector	PD, APD	AP, APD			APD	APD		APD
Longitud de onda ( $\mu$ )	0,8-0,9 1,0-1,7	0,8-0,9 · 1,0-1,7			0,8-0,9 1,0-1,4	0,8; 0,9; 1 · 0-1,3		0,8-0,4 1,0 1,55
Separación entre repetidores	2-3    -30	0,8    10			10    -30	10-12    20-30		10    20-100

b) Conceptos elementales de guiado de luz

I. Reflexión y refracción de la luz

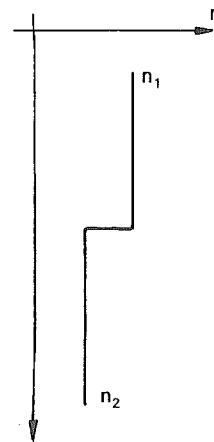
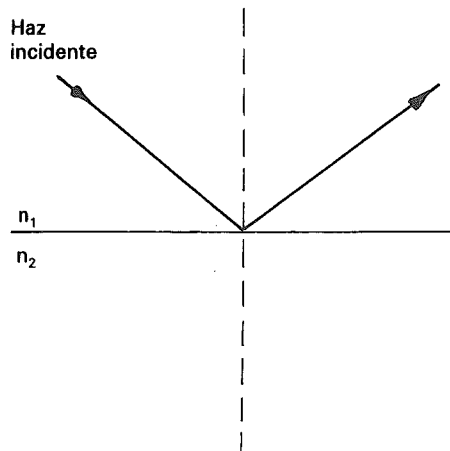


Ley de Snell

$$\frac{\sin \theta}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

1) Refracción para  $\theta_1 = 30^\circ$   $n_1 = 1$   $n_2 = 1,5$

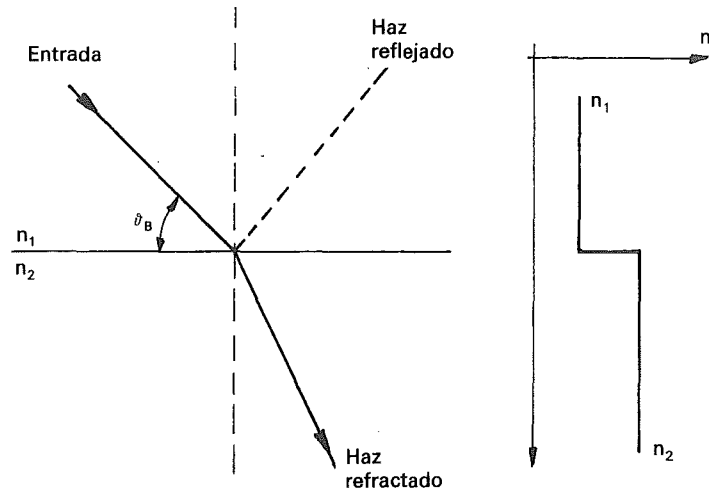
En este caso, el rayo incidente es reflejado y refractado.



A partir de un cierto ángulo llamado *ángulo crítico de reflexión total*, el haz se refleja totalmente. Ese ángulo crítico viene dado por:

$$\theta_c = \arccos \left[ \frac{n_2}{n_1} \right]$$

2) Reflexión total para  $n = 1,2$   $n_2 = 1$

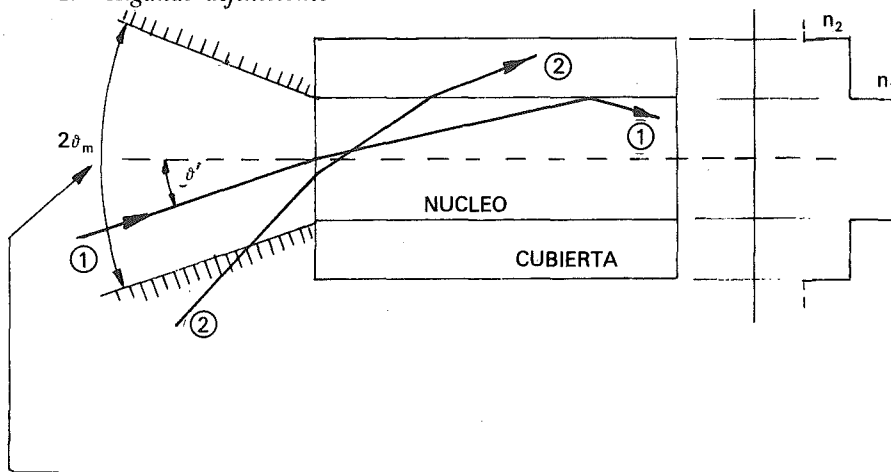


No aparece ningún haz reflejado; todo el haz está refractado:

$$\theta_B = \arctan \frac{n_2}{n_1}$$

c) Incidencia con el ángulo de Brewster.

## II. Algunas definiciones



- ① rayo guiado
- ② rayo perdido

Cono de aceptación de luz = rayos que tienen unos ángulos que están por debajo del ángulo de reflexión total.

No toda la luz va a ser transmitida porque algunos de los haces entran con un ángulo superior al ángulo crítico de reflexión total. Sólo a partir de una cierta distancia tendremos una transmisión estacionaria.

— Diferencia relativa de índices de refracción.

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

— Ángulo crítico de reflexión total en el núcleo.

$$\vartheta = \arccos \frac{n_2}{n_1} = 2 \arcsin \sqrt{\frac{\Delta}{2}} = \sqrt{2\Delta} \quad \Delta < 1$$

– Angulo de aceptación.

$$2\vartheta'm = \arcsin (n_1 \sin \vartheta_c) = 2 \arcsin \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

– Apertura numérica, NA.

$$NA = \sin \vartheta'm = n_1 \sqrt{2\Delta}$$

(Ej:  $\Delta = 1\%$   $n_1 = 1,5$   $NA = 0,21 \rightarrow 2\vartheta'm = 24^\circ$ )

Siendo  $\vartheta'm$  el ángulo de aceptación.

– Constante de programación o fase.

$$K_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$$

– Número de modos que se propagan.

$$N_m = \frac{V}{\pi/2}$$

donde  $V$  = Anchura normalizada de la guía

$$V = K_0 a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \cong \pi \left[ \frac{2a}{\lambda} \right] n_1 \sqrt{2\Delta}$$

siendo  $a$  = radio del núcleo.

– Velocidad de grupo.

Velocidad de grupo es la velocidad a la que se transmitan los pulsos de luz a través de la guía.

$$V_g = v \cos \vartheta$$

– Longitud de onda de corte.

Aquella en la que la fibra comienza a poder propagar un segundo modo de la guía.

Para una de salto de índice vale.

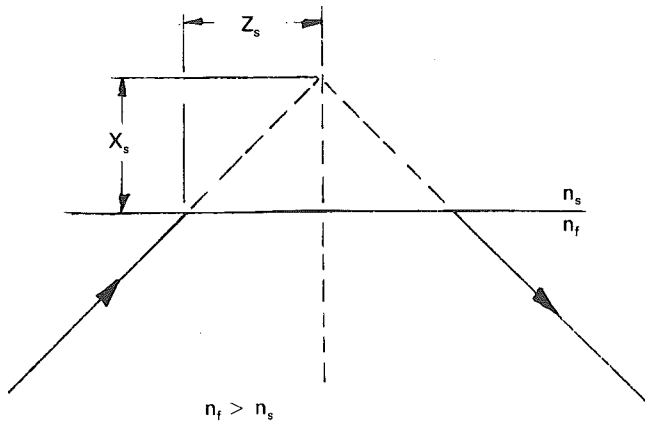
$$\lambda_L = \frac{2\pi a \sqrt{(2\Delta)^{0,5}}}{2,405}$$

A partir de esta longitud la fibra podrá ser binodo.

### III. Desplazamiento de Gods-Hänchen

Tiene lugar cuando ocurre la reflexión total. El rayo reflejado se “desplaza” literalmente con respecto al incidente, la reflexión no tiene por qué ocurrir obligatoriamente en la

frontera de los dos medios, sino que suele ocurrir a una determinada distancia de la separación entre los dos medios.



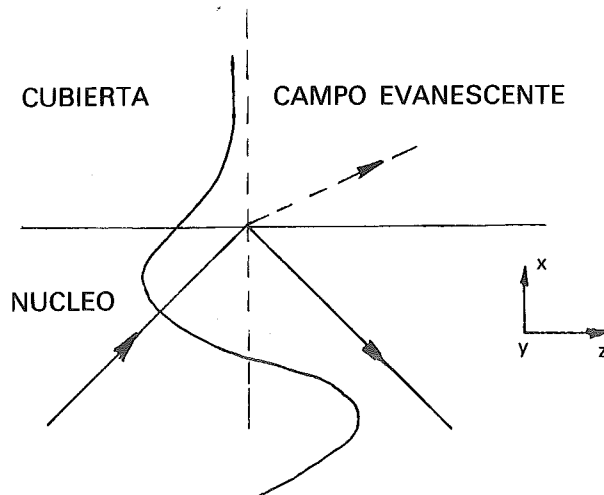
$$KZ_s = \frac{(N^2 - n_s^2)^{-1/2} \operatorname{tg} \theta}{\frac{N^2}{n_s^2} + \frac{N^2}{n_f^2} - 1}$$

$$KZ_s = (N - n_s^2)^{-1/2} \operatorname{tg} \theta$$

$$\text{Con } N = n_f \operatorname{sen} \theta \text{ y } K_s = \frac{Z_s}{\operatorname{tg} \theta}$$

Este desplazamiento repercute en que la anchura efectiva de una guía es mayor que la física.

#### IV. Recordatorio del campo evanescente



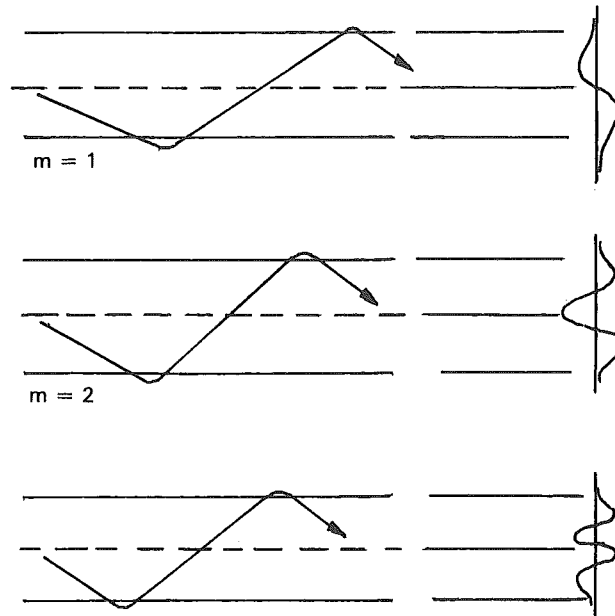
Ocurre que en la reflexión total la amplitud del campo en la cubierta decae exponencialmente en la dirección de X.

Este campo lleva y transporta energía en la dirección de Z.

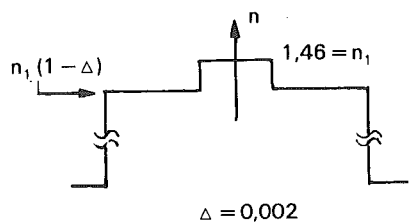
#### c) Modos

Todos los modos se propagan con un cierto ángulo. El modo de orden 0 es el que se propaga paralelo al eje de la guía, aunque esto no es posible.

El modo de orden 0 suele propagarse en un ángulo de 0,5 grados para el caso de 8.500 Å, un índice de 1,5 y un tamaño de 100  $\mu$ .



#### d) Propiedades típicas de una fibra monomodo



Atenuación: En el límite de 0,45 dB/Km a 1.550 nm.

Ancho de banda: Teóricamente 1000 GHz·Km o más, pero limitado por la anchura espectral de la fuente y los efectos de segundo orden y dispersión del material.

Núcleo: De uno a varios  $\lambda$  de diámetro. Puede incrementarse rebajando NA. Pero las pérdidas por radiación aumentarán con curvas y/o con variaciones de dimensión.

Cubierta: Puede y debe ser mayor de diez veces el radio del núcleo. El mayor espesor reduce peligros de manejo.

Acoplo: Requiere que la fuente de luz tenga un tamaño igual o menor que el área del núcleo.

#### e) Propiedades típicas de una fibra. Multimodo de índice gradual

Atenuación: Aumenta con la apertura numérica: 0,5-2,0 dB/Km.

Ancho de banda: Mayor de 1 GHz·Km para un perfil optimizado a ancho de banda máxima. Limitado por control y perfil, y el perfil cambia con  $\lambda$ .



Núcleo: De 50 a 60  $\mu\text{m}$  de diámetro con NA de 0,2 a 0,3

Cubierta: Espesor de 10  $\lambda$  y una relación de 2:1 del diámetro externo al núcleo. Esto es adecuado para pequeñas pérdidas de microcurvatura.

Acoplo: La eficiencia de acoplo de una fuente lambertina de tamaño igual al del núcleo es de  $(NA)^2/2$  a un laser con lente de acoplo es superior al 90 %. El acoplo fibra-fibra requiere una precisión de alineamiento de 10 % para unas pérdidas menores de 1 dB.

Las pérdidas dependen de la distribución de modos en la fibra en el propio acoplo.

f) **Propiedades típicas de una fibra. Multimodo de salto de índice**

Atenuación: Próxima al límite teórico de dispersión de RAYLEIGH.

Núcleo: Aproximadamente 20  $\text{MHz}_z \text{ Km.}$  y está limitado por la dispersión modal.

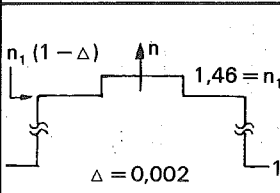
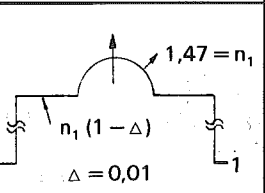
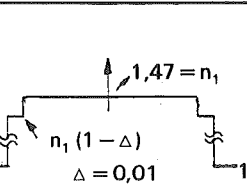
Núcleo: El mayor eje posible es de 80  $\mu\text{m}$  de diámetro con NA de 0,3 a 0,6.

Cubierta: Una relación de 2:1 entre diámetro externo y diámetro del núcleo es adecuada para bajas pérdidas de micro curvatura.

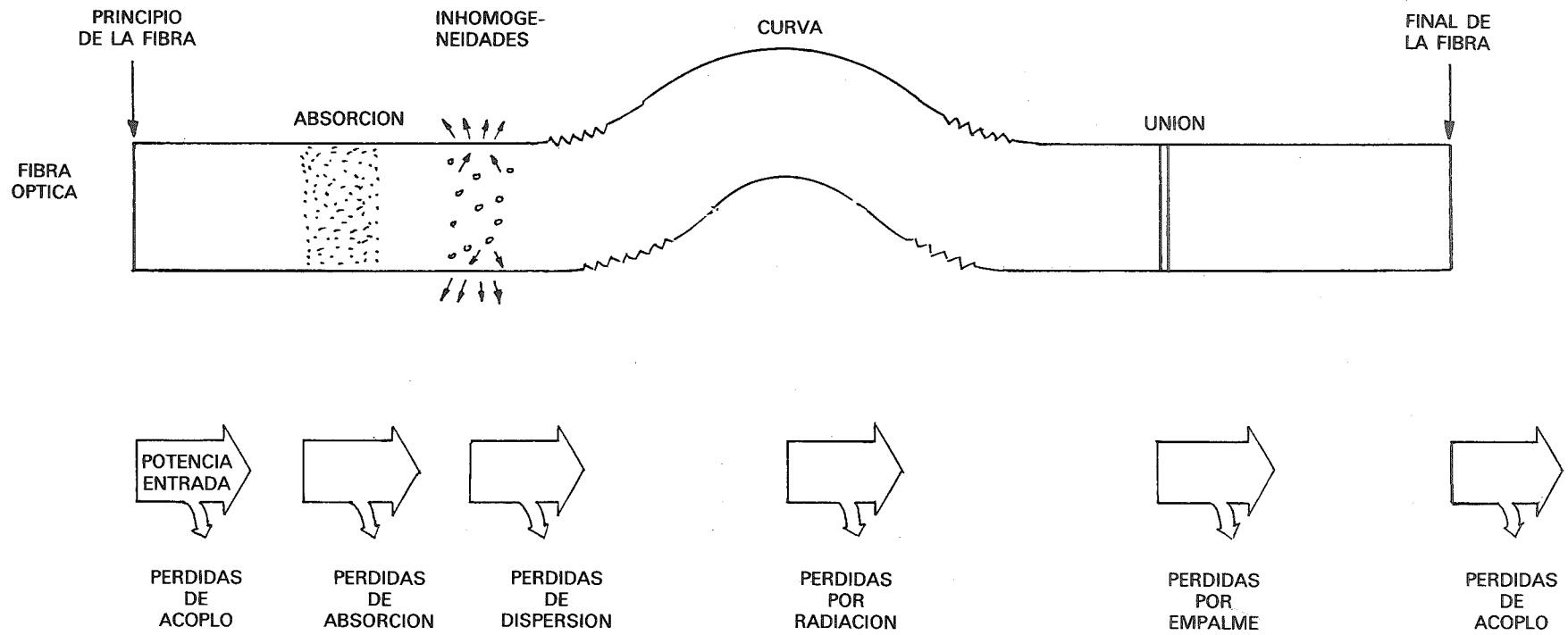
Acoplo: Para una fuente de Lambert de tamaño igual al del núcleo es igual a  $(NA)^2/2$ .

El acoplo fibra-fibra es muy sensible al desalineamiento lateral (1 dB con 10 %). Las pérdidas dependen de la distribución de modos en el punto de acoplo.

Podemos resumir estas propiedades en una tabla comparativa.

	Fibra monomodo	Fibra multimodo (Gradual)	Fibra multimodo (Salto de índice)
			
FUENTE	Requiere LASER	LASER o LED	LASER o LED
ANCHO DE BANDA	Muy muy grande Mayor a 3 $\text{GHz}_z \text{ Km.}$	Muy grande de 200 $\text{MHz}_z$ a $\text{GHz}_z \text{ Km.}$	Grande Menor a 200 $\text{MHz}_z \text{ Km.}$
EMPALMES	Muy difíciles por pequeño núcleo	Difíciles pero factibles	Difíciles pero factibles
EJEMPLO DE APLICACION	Cable submarino	Unión de centrales	Redes de transmisión de datos
COSTO	Medio	El más alto	El más bajo

# MECANISMOS DE PERDIDAS EN UNA FIBRA



g) Características de Transmisión de las fibras ópticas

• ATENUACION

La atenuación en una fibra óptica viene provocada por 5 factores diferentes.

- Absorción por el material
- Dispersión (lineal y no lineal) en el material
- Pérdidas por curvaturas de la fibra
- Pérdidas por radiación por acople de modos
- Pérdidas por modos perdidos

1. *Absorción del material*

Este tipo de absorción es debido principalmente a las siguientes causas:

– composición del material. La absorción dependerá de los niveles energéticos de la fibra.

– proceso de fabricación de la fibra.

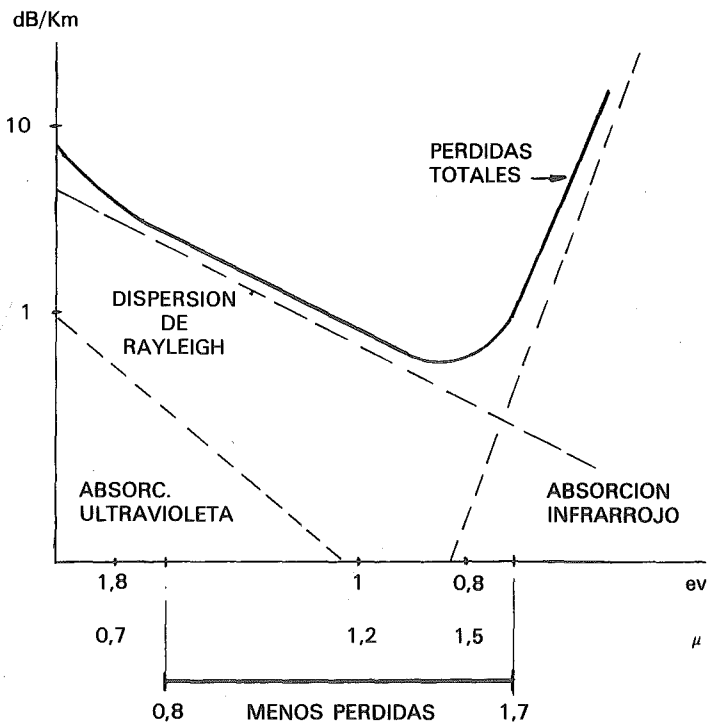
• ABSORCION INTRINSECA

Originada por la interacción con uno o más de los componentes básicos del vidrio. Aun siendo el material puro habría pérdidas. Siempre existe la dispersión de RAYLEIGH que es intrínseca al material.

– pérdidas en el ultravioleta por transiciones electrónicas

– pérdidas en el infra-rojo por interacción FOTON-FOTON.

(fuertes para: Si-O, P-O, B-O, Ge-O)



— éstas pérdidas pueden ser minimizadas por una adecuada elección del material del núcleo y cubierta.

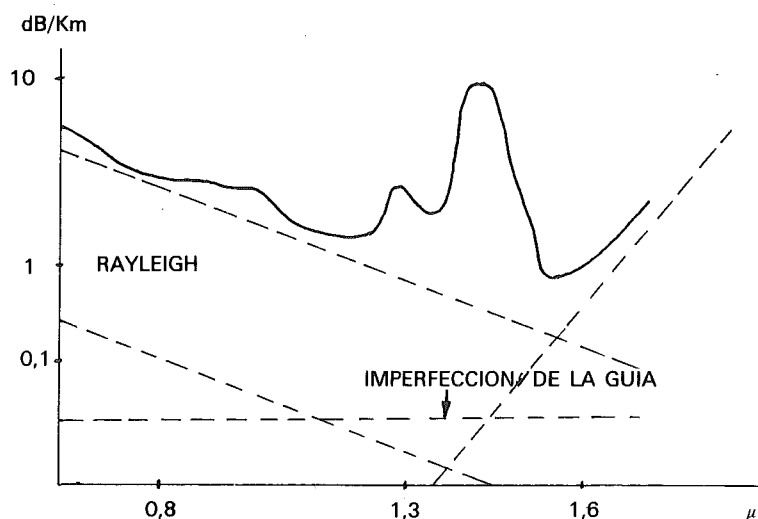
La zona reflejada en el gráfico como zona de menor pérdidas es la zona aprovechable donde debería estar la fibra para minimizar las pérdidas.

#### • ABSORCION EXTRINSECA

Este tipo de absorción está originado por las impurezas del vidrio. Estas impurezas son principalmente metales de transición como CR, Cu, Fe, Ni ...

— Otra causa muy importante es el Agua (como ión  $\text{OH}^-$ ) sus vibraciones fundamentales son entre 2,7 y 4,2  $\mu$  tiene overtone en 1,38; 0,95 y 0,72  $\mu\text{m}$ .

Además, si se combinan con las del  $\text{Si O}_2$  da otras en 1,24; 1,23 y 0,88.



La menor atenuación se encuentra en 1,55 y será de dB/Km. El número menor no bajará de 0,18 dB/Km.

Podemos observar también que hay otro mínimo en 1,3, por lo que deberíamos tender a trabajar en estos dos números.

#### 2. Pérdidas por dispersión lineal

Están originadas por la transferencia de potencia de un modo a otro, de forma proporcional a la potencia del modo. Si el nuevo modo es radiante, la energía se pierde.

Hay dos tipos principales de RAYLEIGH y de MIE.

#### • DISPERSION DE RAYLEIGH

Originada por inhomogeneidades aleatorias de tamaño menor que la longitud de onda. El índice de refracción sufre unas fluctuaciones de bridas o variaciones de densidad y de composición originadas en la fabricación.

La atenuación es proporcional a  $1/\lambda^4$  en todas las direcciones.

### • DISPERSION DE $M_E$

Debido a las inhomogeneidades de tamaño comparable al de la longitud de onda, está originada por la estructura cilíndrica no perfecta, irregularidades de la interfase núcleo cubierta, fluctuaciones del diámetro, tensiones, burbujas. Cuando las irregularidades son superiores a  $\lambda/10$  entonces la dispersión puede ser muy grande y principalmente en la dirección hacia adelante.

Esta dispersión se puede reducir de las siguientes formas:

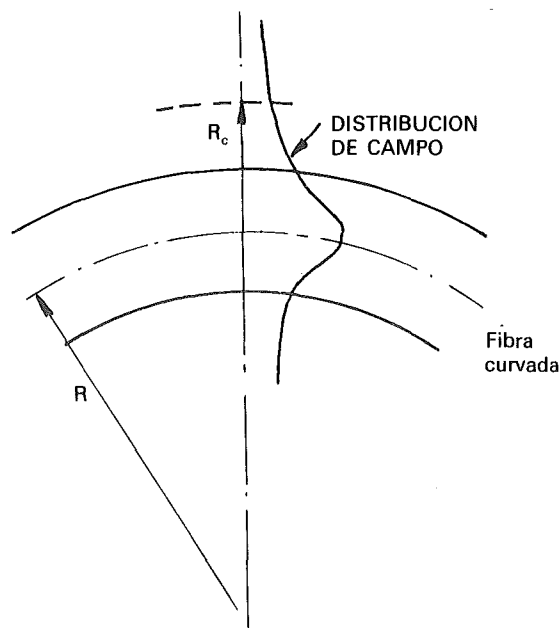
- reducción de imperfecciones en la manufactura
- incremento de las diferencias de índices
- extrusión cuidada

### 3. Pérdidas por curvaturas de las fibras

Esta clase de pérdidas se produce siempre y cuando la fibra sufre una curva de radio finito.

Las curvas se pueden dividir en dos clases:

- de radio superior al diámetro de la fibra (1)
- curvas microscópicas y aleatorias del eje de la fibra al incorporarse a cables (2).



Estas pérdidas aparecen por la energía radiada a partir de una cierta distancia  $R_c$  del campo evanescente, que desde ese punto debería ir a velocidad superior a la de la luz si siguiera con todo el campo del núcleo se suelen expresar como:

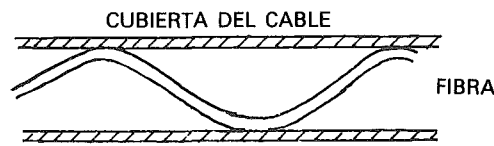
$$L_r = c_1 e^{-c_2 R}$$

$$\text{con } R_c \cong \frac{3n_1^2 \lambda}{\pi(n_1^2 - n_2^2)^{3/2}}$$

Puede ocurrir que ciertos modos desaparezcan al incidir con ángulos con los que no se tenga reflexión total.

Estas pérdidas se reducen aumentando la diferencia de índices, lo que implica una disminución de la distancia  $R_c$ , o bien trabajando con una longitud de onda lo menor posible.

(2) Las curvas microscópicas aparecen durante el cableado por diversas causas.



#### 4. *Dispersión intramodal o cromática*

Derivada de la anchura de la línea del emisor. Cada  $\lambda$  se propaga con diferente velocidad, esto puede deberse al material de la guía o a su estructura. La velocidad de transmisión por un determinado medio depende de su índice de refracción. Aunque todos los componentes espectrales partan en el mismo momento, cada uno de ellos llegará en un tiempo distinto porque su índice de refracción y su propagación son diferentes.

#### DISPERSION POR EL MATERIAL

Debido a las diferentes velocidades de grupo de los diferentes componentes espectrales introducidos en la fibra. El origen es la variación no lineal del índice de refracción con la longitud de onda.

Esta dispersión es, por tanto, importante en sistemas con LED'S.

El retardo de grupo,  $\tau_g$ , que es el recíproco de la velocidad de grupo,  $v_g$ , que es el recíproco de la velocidad de grupo  $V_g$ , viene dado por:

$$\tau_g = \frac{dB}{d\omega} = - \frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{dB}{d\lambda} \text{ al ser } \beta = \frac{2\pi n(\lambda)}{\lambda}$$

$$\tau_g = \frac{1}{c} \left( n_1 - \lambda \frac{dn_1}{d\lambda} \right) \quad n_1 = \text{índice de refracción del núcleo}$$

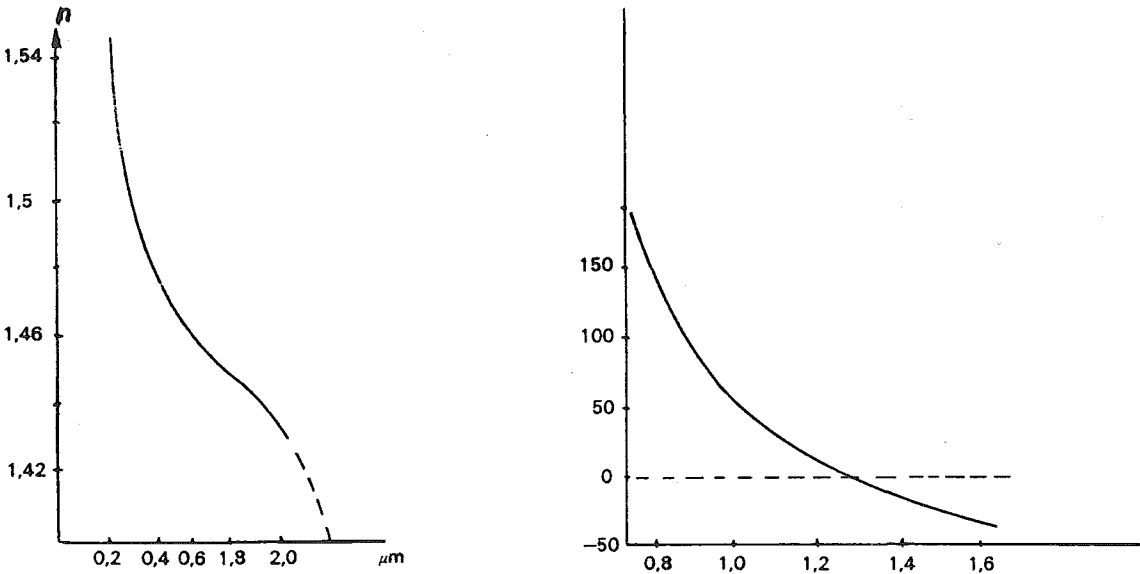
El retardo de pulso,  $\tau_m$ , en una longitud  $L$  de la fibra será:

$$\tau_m = \frac{L}{c} \left[ n_1 - \lambda \frac{dn_1}{d\lambda} \right]$$

El ensanchamiento del pulso, si el emisor tiene una anchura espectral de  $\Delta\lambda$  y un valor eficaz  $\sigma\lambda$  será:

$$\tau_{met} = \frac{d\tau_m}{d\lambda} \sigma\lambda \quad M = \frac{\lambda}{c} \left[ \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} \right]$$

Dispersión del material.



### Indice de refracción de la sílice

Dispersión de la sílice se hace cero para  $\lambda = 1,27 \mu m$ .

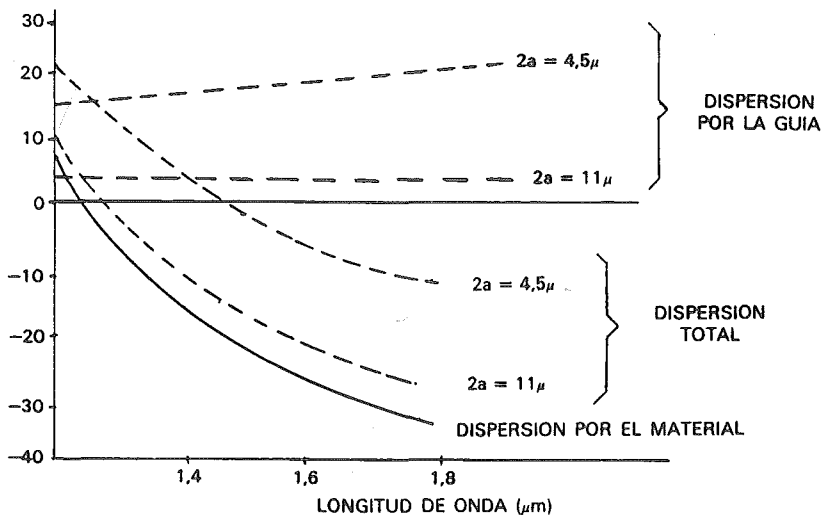
Puede desplazarse entre 1,2 y 1,4 con dopajes adecuados.

Se debería trabajar alrededor de  $1,3 \mu$  o con emisores de muy pequeño valor de  $\sigma\lambda$  (anchura espectral).

### • DISPERSION POR LA GUIA-ONDA

Esta dispersión es despreciable en fibras multimodo y muy importante en las fibras monomodo. En esta clase de fibras es muy difícil separar los diferentes mecanismos. Viene dada por la diferencia de índices entre el núcleo y la cubierta.

Aparece cuando  $d^2\beta / d\lambda^2 \neq 0$ .



– Dispersiones en una fibra monomodo de núcleo de sílice fundida.

## h) Tipos de fibras

### 1. Fibras de dispersión desplazada y de dispersión aplanada

#### OBJETIVOS:

Fibra de dispersión desplazada:

Con esta clase de fibra se intenta llevar la curva de dispersión a una zona donde se haga cero para  $1,55 \mu$ .

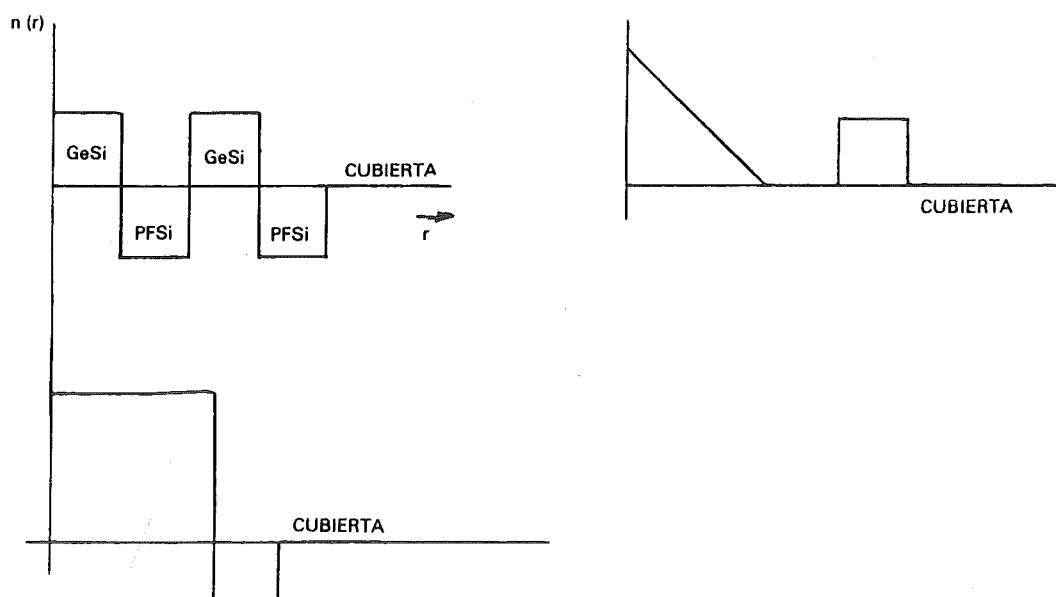
Fibra de dispersión aplanada:

Se intenta conseguir hacer que la curva de dispersión se haga casi horizontal y con el mínimo valor posible.

Formas de conseguirlo:

Variando el perfil convencional de las fibras (núcleo y cubierta del índice de refracción, de manera que la dispersión material y la cromática se compensen.

Ejemplo de soluciones tomadas:



#### 1.1 Fibras de dispersión desplazada (dispersión-shifted)

La longitud de onda en la que la suma de las dispersiones del material y de la guía se hacen cero se lleva a  $1,55 \mu\text{m}$ , que corresponde con la mínima atenuación.

#### 1.2 Fibras de dispersión aplanada (dispersión-flattened)

La dispersión de la guía se modifica de manera que la dispersión total sea reducida desde:  $3 \mu$  hasta  $1,55 \mu$ .



Formas de conseguirlo:

Mediante capas múltiples en núcleo y cubierta.

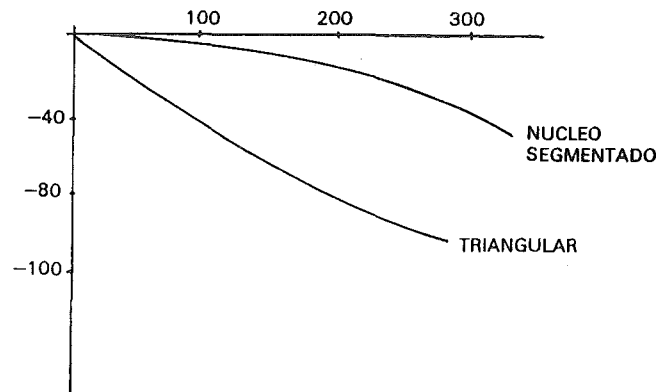
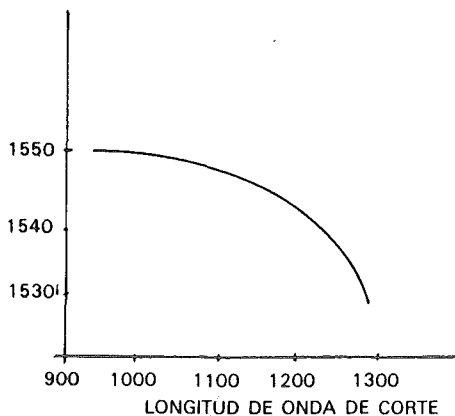
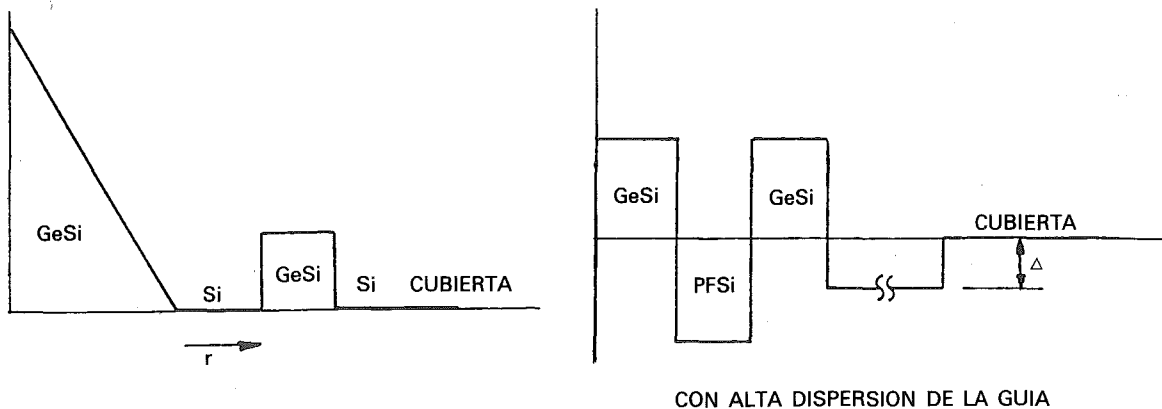
1.2.1. *Diseños de núcleo segmentado* (sirven tanto para dispersión desplazada como aplanada).

1.2.2. *Núcleos de índice gradual de perfil triangular* (sirve solamente para dispersión desplazada).

1.2.3. *De perfil en W o en doble cubierta* (para dispersión tanto desplazada como aplanada).

1.2.4. *De cubierta cuádruple* (para dispersión aplanada).

1.1. Fibras de núcleo segmentado

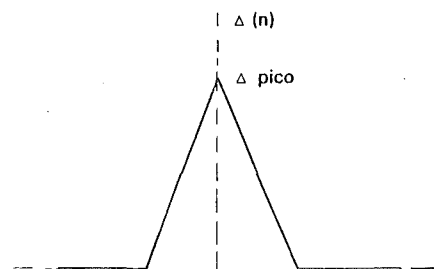


1.2. Fibras de perfil triangular

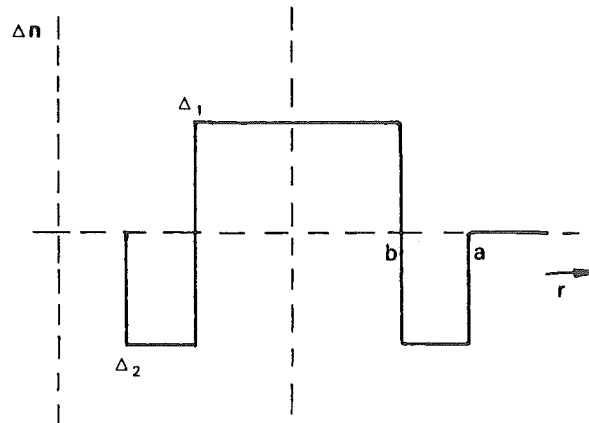
*Características de la fibra:*

- Atenuación de 0,24 dB/Km. a 1,55  $\mu$ .
- Diámetro núcleo = 6,4  $\mu$ .
- Radio del campo = 4,7  $\mu$ .
- Pérdidas de empalme  $\approx$  0,66 dB.

- Longitud de onda de corte: 0,85  $\mu$ . Esta característica implica que tenga una alta sensibilidad a las curvas.

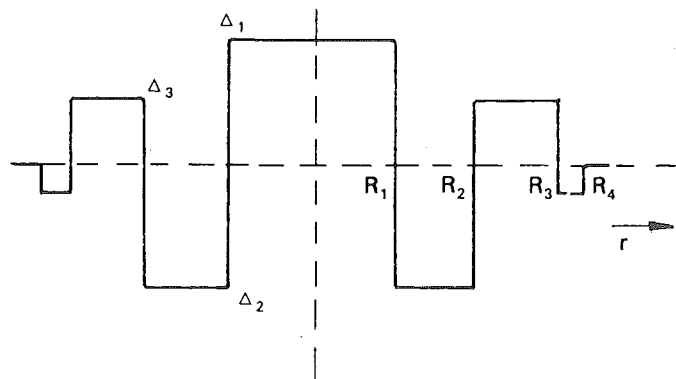


### 1.3. Fibras de doble cubierta o en W



Como características principales podemos citar que estas fibras no mantienen al mismo tiempo la baja atenuación y disposición cero.

### 1.4. Fibras de cuadruple cubierta



*Características de este tipo de filtro:*

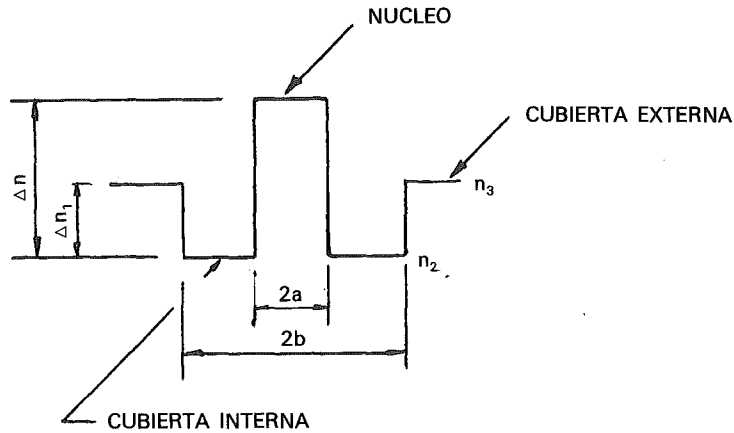
- Disposiciones por debajo de los  $2p3/nm\cdot Km$  entre  $1,28$  y  $1,65 \mu$ .
- Atenuación de  $0,4 \text{ dB/Km}$  a  $1,55 \mu$ .

Veamos a continuación, con más detalle, las *fibras en W*.

Estas fibras proporcionan mayor flexibilidad para compensar la disposición, mediante un perfil de índices con más parámetros de ajuste.

Como se ve en el dibujo adjunto, la fibra está compuesta por un núcleo, una cubierta interna y otra externa.

La cubierta interna actúa a modo de "pantalla" para eliminar gran parte de la radiación de la externa.

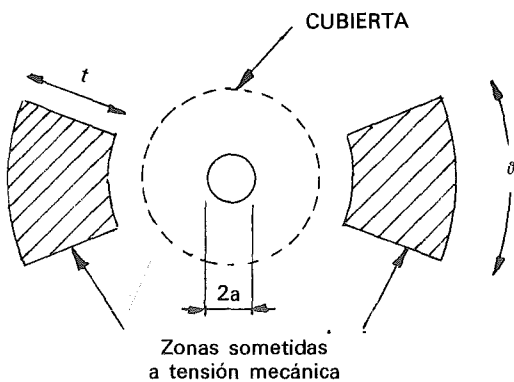


## 2. Fibras capaces de mantener la polarización

Con las llamadas fibras tipo PANDA (Polarization-maintaining and absorption-reducing).

Un material propaga una radiación óptica sin perturbaciones si tiene propiedades isotrópicas en todas las direcciones.

Ejemplo:



Unos valores típicos son:

$$2a = 4 \mu\text{m}$$

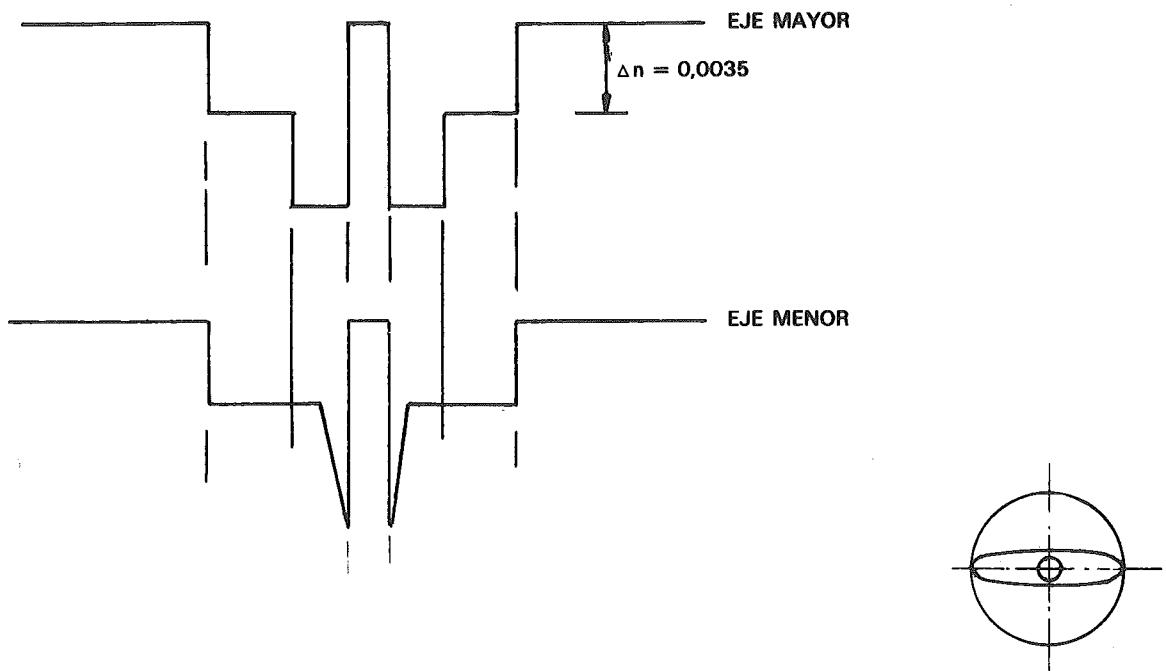
$$\frac{t}{a} = 56$$

$$\theta \cong 90^\circ$$

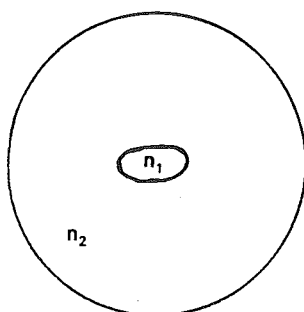
Se consigue distorsionando las características isotrópicas del material, bien por deformaciones metálicas o bien por adicción de otros constituyentes.

### 2.1. Fibras de polarización única

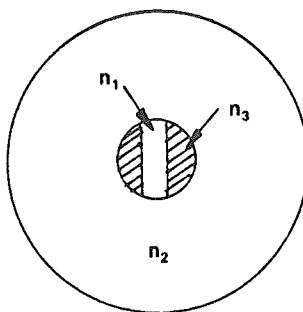
Estas fibras tienen como propiedad característica que son capaces de transmitir sólo una polarización de la luz.



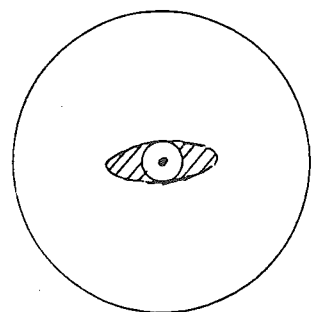
## 2.2. Tipos de fibras de polarización única



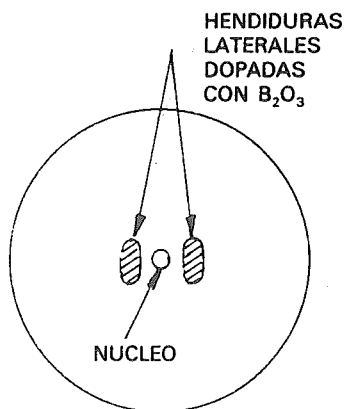
(a) Fibra de núcleo elíptico



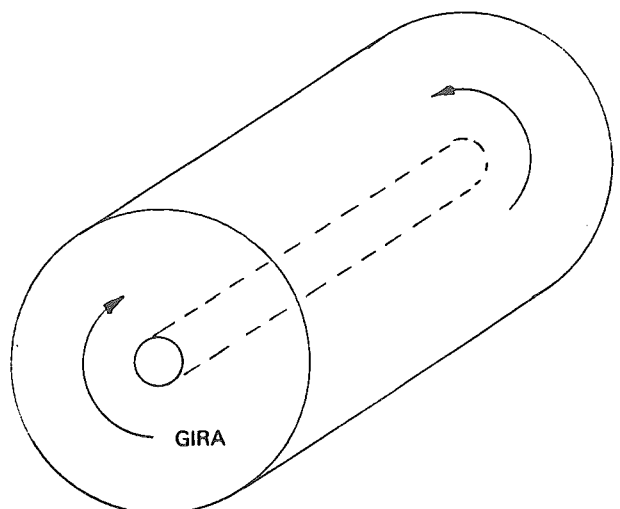
(b) Fibra de índice de refracción hendido



(c) Fibra de envoltura elíptica

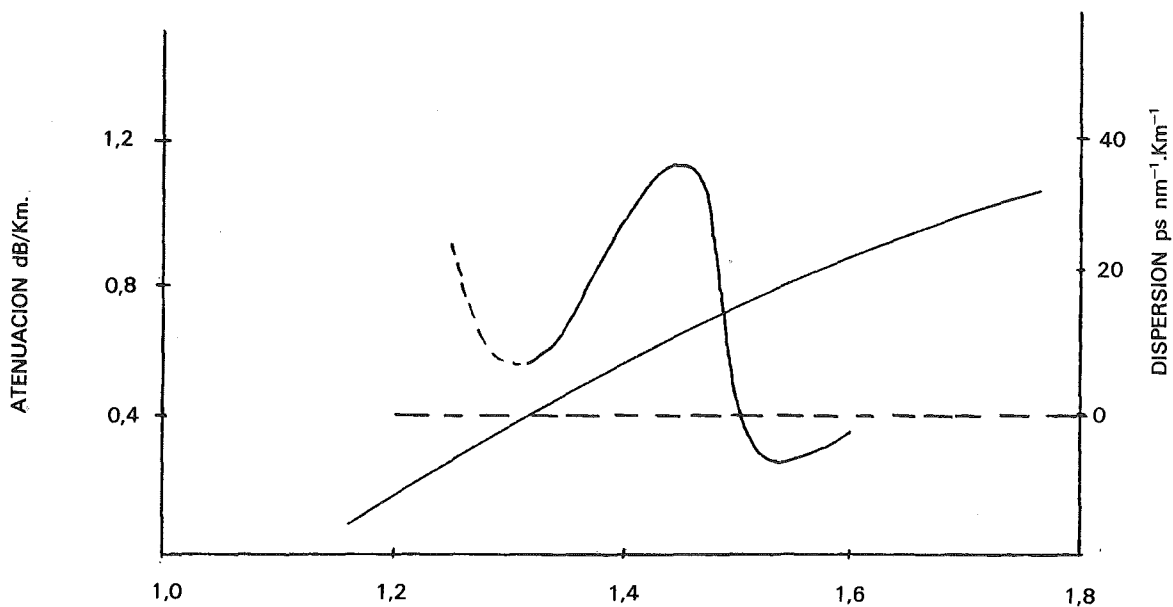


(d) Fibra con hendiduras laterales y tensiones inducidas



(e) Fibra torsionada

## FIBRAS MONOMODO



Atenuación y dispersión típicas de una fibra monomodo

### OBJETIVOS:

El proceso de los objetivos es trabajos en las zonas de atenuación mínima. Se suele trabajar en las dos ventanas clásicas.

- En la segunda ventana, situada a  $1,3 \mu$ .
- En la tercera, situada a  $1,5 \mu$ , aproximadamente.

El otro de los objetivos a alcanzar es trabajar en la zona de mínima dispersión. En  $1,31 \mu$  se encuentra el punto de mínima dispersión (Con dispersión prácticamente nula).

De estas observaciones podemos concluir que en una de las ventanas la atenuación es pequeña, pero no mínima y la dispersión es nula. En la otra, en cambio, la atenuación es mínima, pero la dispersión no nula.

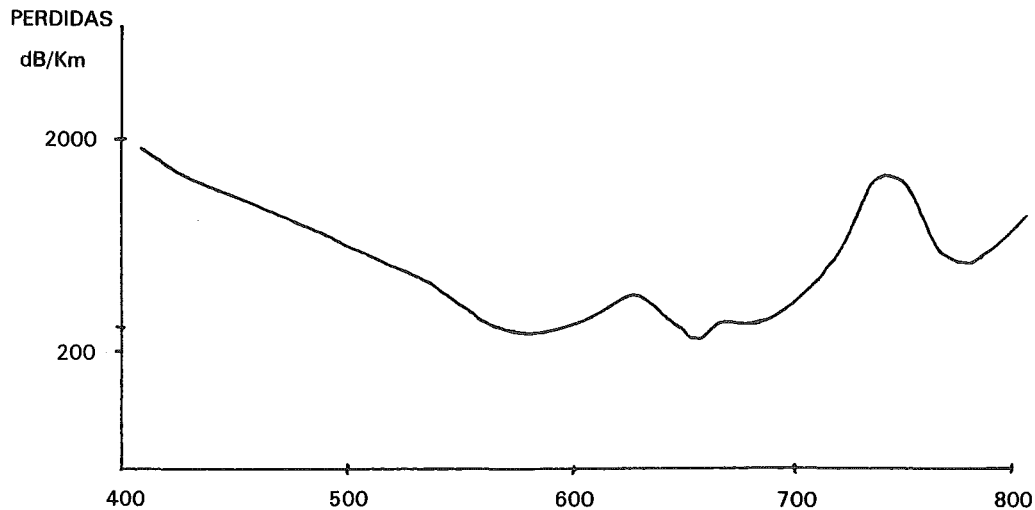
Se pretende obtener un punto donde la dispersión sea nula y la atenuación mínima.

### 3. Fibras de plástico

Estas fibras se componen de núcleo y cubierta.

Los materiales utilizados son, para el núcleo polimetilmetacrilato (PMMA) ( $n = 1.495$ ) y para la cubierta se suelen utilizar polímeros con fluoruros ( $n = 1.402$ ).

Con estos materiales la apertura numérica es de 0,47 y el ángulo  $\theta$  es  $36^\circ$ .



Tienen varias ventajas este tipo de fibras sobre las demás. Tienen muy bajo costo y además son flexibles y fáciles de manejar. Por contra, tienen dos inconvenientes muy acentuados.

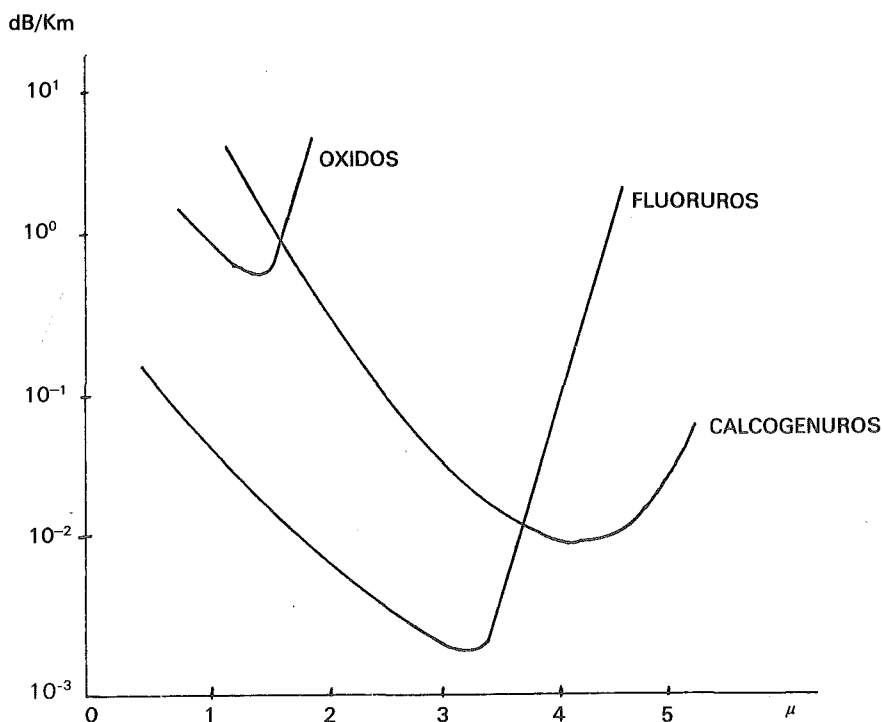
Por una parte, tienen una alta atenuación y, por otra parte, tienen una baja resistencia a la temperatura.

Estas fibras están utilizadas, por tanto, por distancias muy cortas. Una aplicación clásica es la de los automóviles en los guiados de luz.

### 3.1. Fibras para el infrarrojo

Esta clase de fibras tienen una característica esencial:

Sus pérdidas son muy reducidas del orden de  $10^{-3}$  dB/Km.



Esta característica contrae alguna ventaja:

- Estas fibras permitirán mayores distancias sin repetidores.
- Por otra parte, tienen la posibilidad de transmitir energía láser a longitudes de onda mayores.

El interés actual está centrado en los fluoruros de zirconio para 0,2 a 7,5  $\mu$ .

Por contra, las fibras de infrarrojos son frágiles, caras y difíciles de purificar.

#### 4. Resumen de fibras ópticas

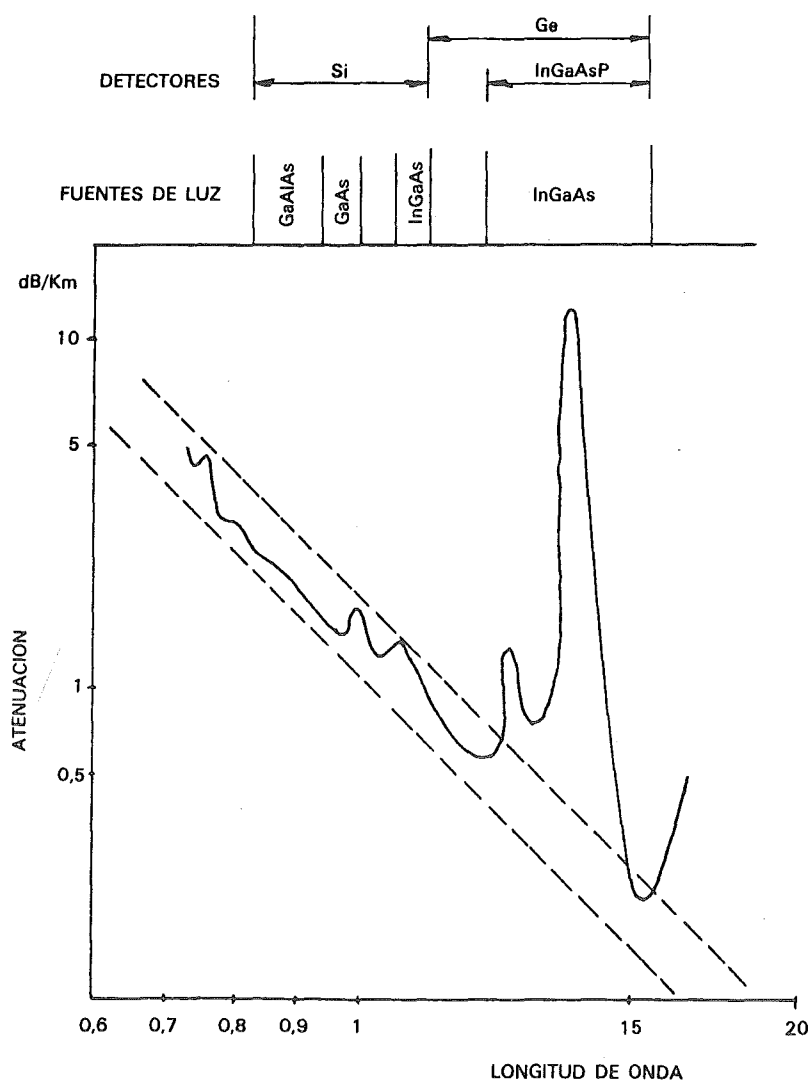
A modo de resumen, expondremos los requisitos básicos que debe tener una fibra óptica:

I.—Material de bajo coste.

II.—Fáciles de manejar.

III.—Baja atenuación.

IV.—Índice de refracción constante con la longitud de onda, es decir:  $\lambda^2 (d^2n/d\lambda^2) \cong 0$ .



Podemos observar en la gráfica que la naturaleza ha sido en cierto modo generosa. Se observa que para las diferentes ventanas de baja atenuación podemos encontrar tanto fuente de luz como detectores de los mismos materiales.

### i) Medidas en fibras ópticas

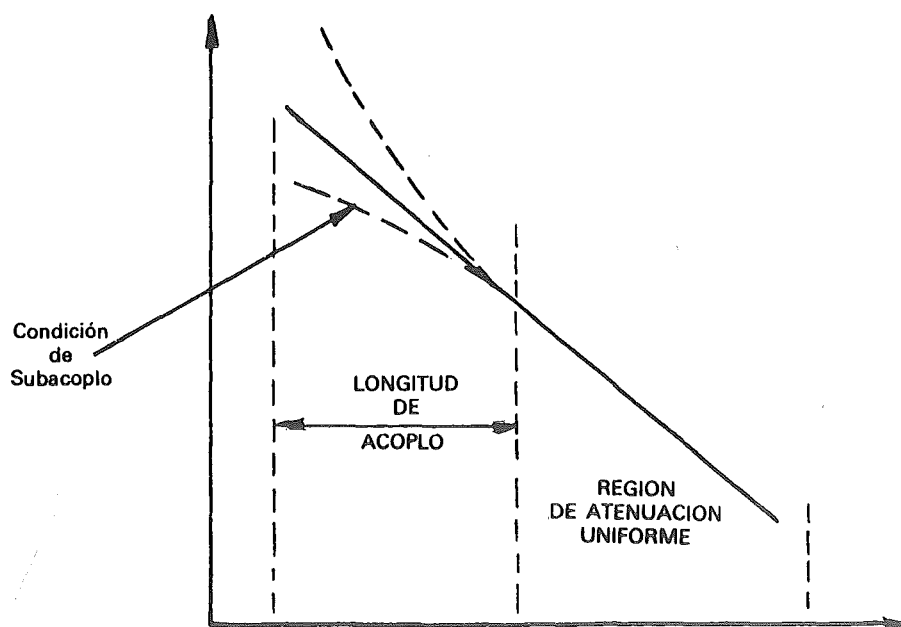
En cuanto a las medidas de fibras ópticas se refiere, se pueden agrupar en tres grandes áreas:

- Características de transmisión.
- Características geométricas y ópticas.
- Características mecánicas.

Las medidas son necesarias con dos fines esenciales:

- Al diseñador de fibras para mejorar las preformas.
- Al ingeniero de sistemas para sus cálculos de diseño.

#### 1. Medidas de pérdidas de transmisión

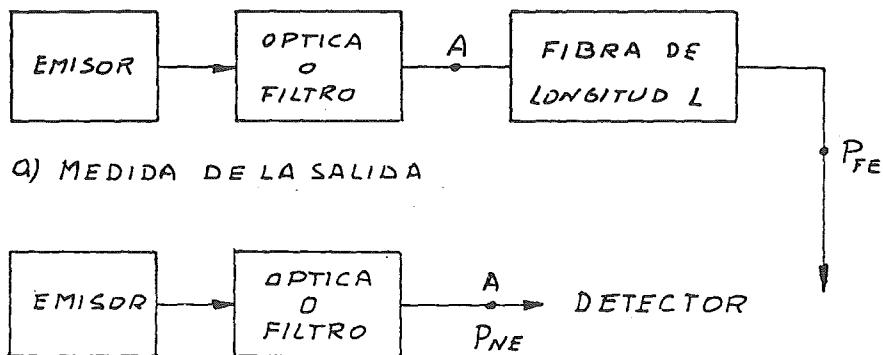


Las pérdidas totales, medidas en fibras multimodos dependen de las condiciones de acople emisor-fibra y de cómo éstas distribuyen la potencia entre los diferentes modos.

(Refiriéndose a la gráfica)  $L_c$  depende de si hay sobre o subacoplo (los modos se acoplan o se pierden). Luego se llega al *equilibrio*; las pérdidas (en dB/Km) son independientes de la longitud de fibra medida.  $L_c$  va de algunas decenas de metros a cerca de 10 Km., tanto más cuanto más han sido diseñadas las fibras para largas distancias. Esto implica un bajo acoplo de modos.



### 1.1. Método de la medida en dos puntos

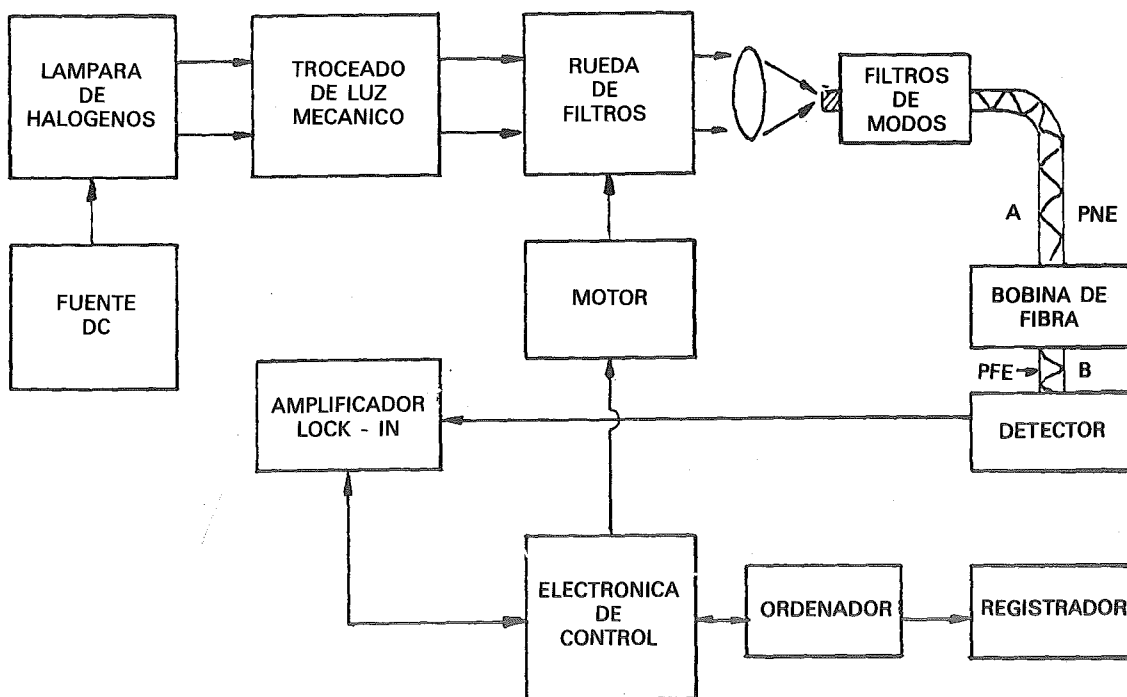


$$\text{ATENUACION: } \underline{A} = 10 \log \left[ \frac{PNE}{PFE} \right] \text{ dB}$$

$$\text{cte de atenuación } \underline{\alpha} = \frac{10}{L} \log \left[ \frac{PNE}{PFE} \right] \text{ dB/m}$$

### 1.2. Medidor automatizado de pérdidas espectrales

#### Diagrama de bloques



#### Modelización de la respuesta espectral

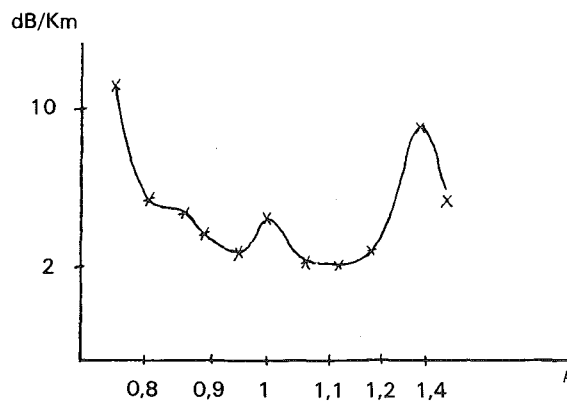
Una modelización corresponde a la siguiente fórmula:

$$\alpha = A \lambda^{-4} + B + C(\lambda)$$

donde:

- A es el coeficiente de Rayleigh.
- B es un cte. dependiente de las condiciones de acoplo, imperfecciones y microcurvaturas.
- C ( $\lambda$ ) es debido a impurezas.

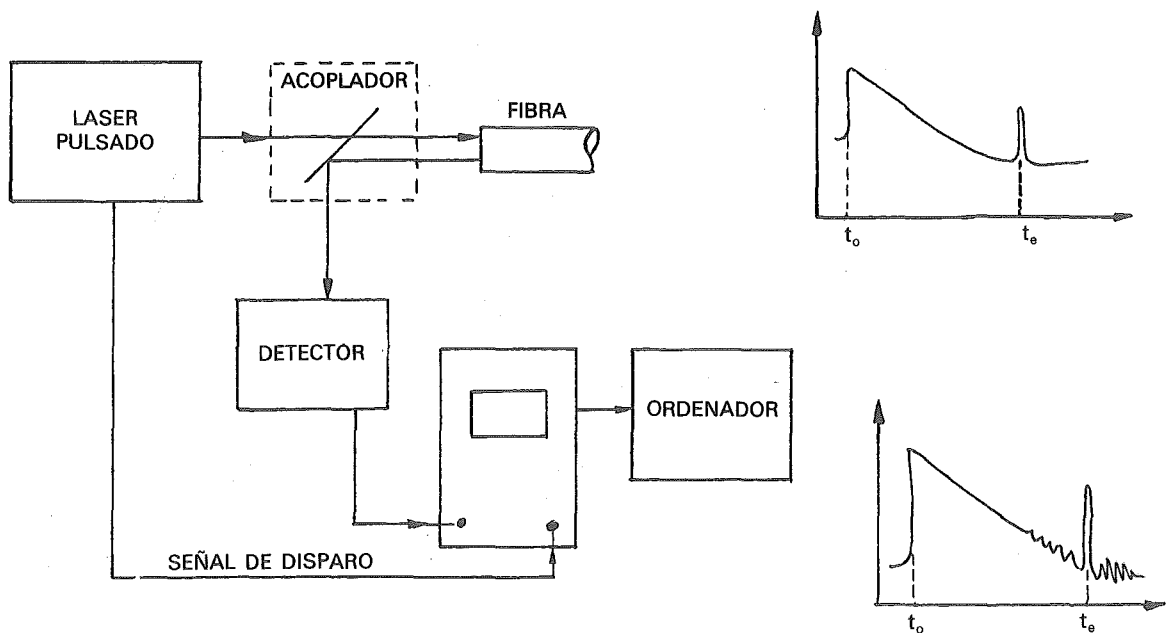
Veamos ahora cómo quedaría la curva de pérdida espectral.

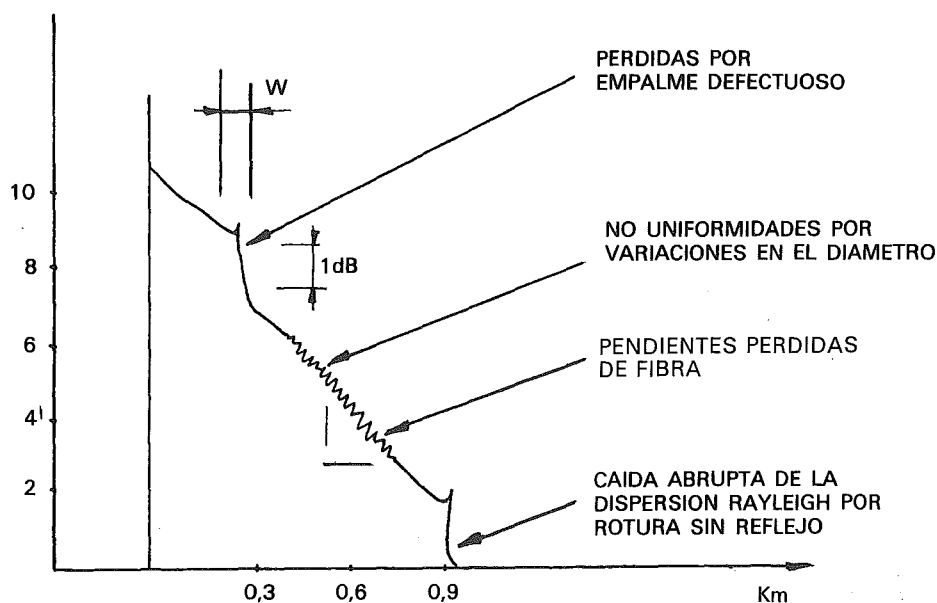


## 2. Reflectometría óptica en el dominio del tiempo (OTDR)

Este método permite medir las pérdidas dependientes de la longitud así como localizar defectos o fallos y medir y/u optimizar las pérdidas de las uniones.

La principal característica de esta técnica es que no es destructiva.





– Distancia a un defecto: 
$$L = \frac{1}{2} C \frac{t}{n_1}$$

siendo  $n_1$  el índice del núcleo.

– Potencia del detector:  $P_d = TRP_0 10^{-2 L/10}$

$P_0$  = potencia salida del láser.

$T$  = transmitancia de todo el sistema.

$\alpha$  = pérdidas totales en dB/Km.

$R$  = coeficiente de reflexión en el extremo.

### 3. Medida del ancho de banda

#### 3.1. Medidas en el dominio del tiempo

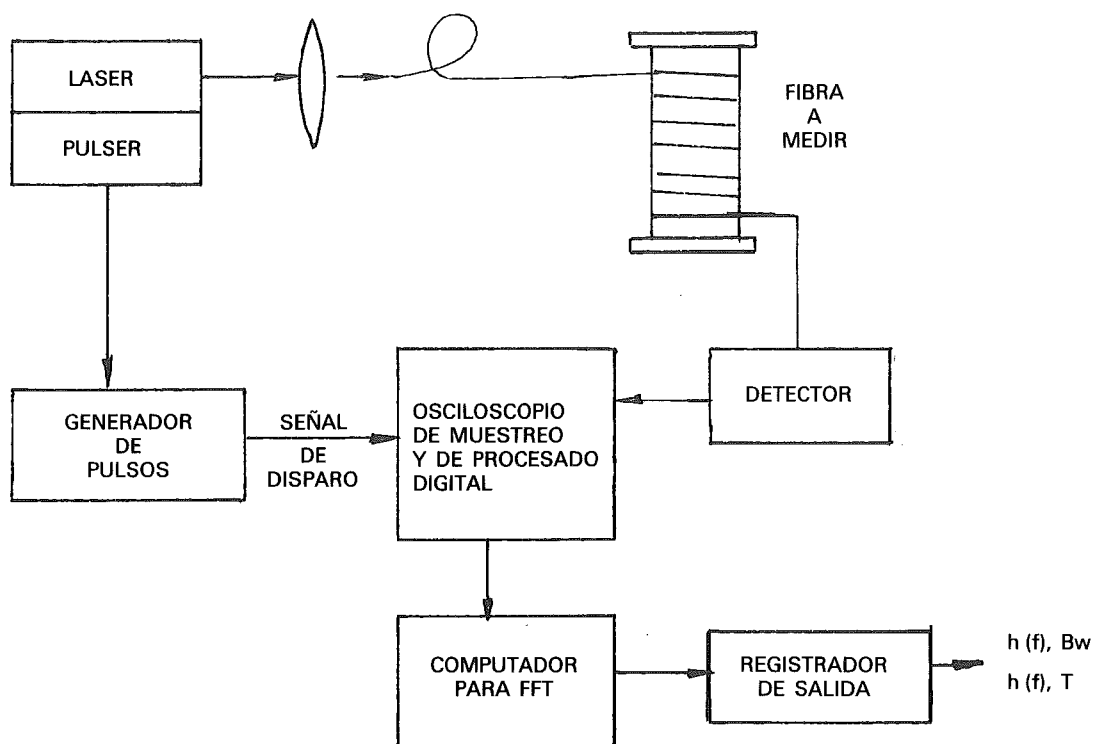
Un pulso estrecho con forma  $P_{in}(t)$  se introduce en la fibra. A la salida se convierte en  $P_{out}(t)$  que se recibe y almacena. La respuesta en frecuencia es:

$$h(f) = \frac{FT(P_{out}(t))}{FT(P_{in}(t))}$$

Siendo FT el símbolo de la transformada de Fourier.

Si  $h(f)$  se retransforma según la transformada inversa al tiempo, el resultado será la respuesta impulsional.

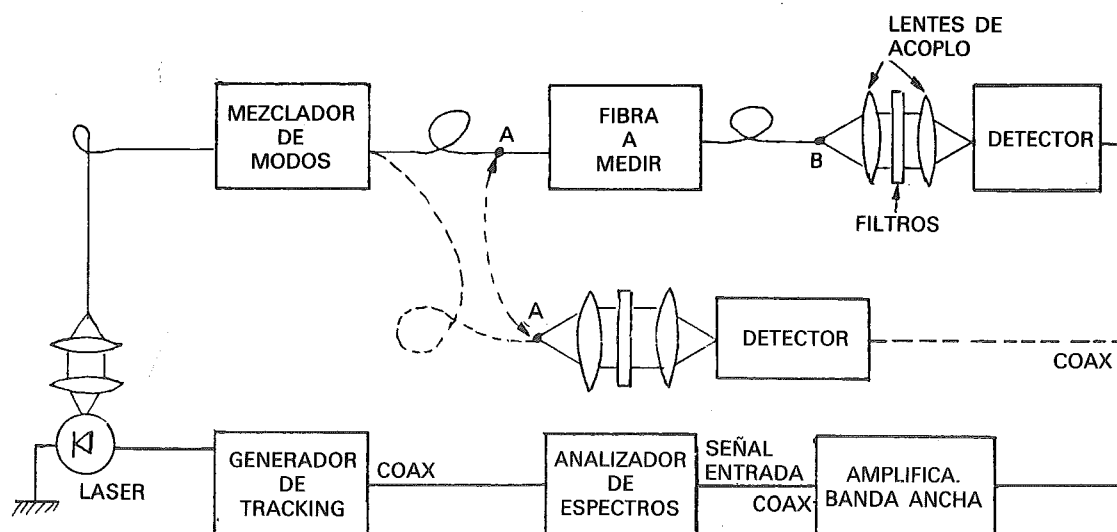
Siendo  $h(t)$  la respuesta impulsional de la fibra.



### 3.2. Medidas en el dominio de la frecuencia

La luz se introduce a una fibra modulada o una frecuencia  $f$ . Lo que se hace es medir la señal que pasa en función de la frecuencia  $f$ .

De esta forma se consigue medir el ancho de banda de una fibra en el dominio de la frecuencia.



### 4. Medidas del perfil del índice de refracción de una fibra

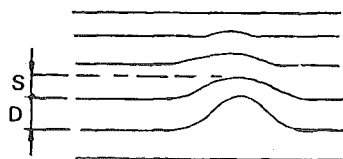
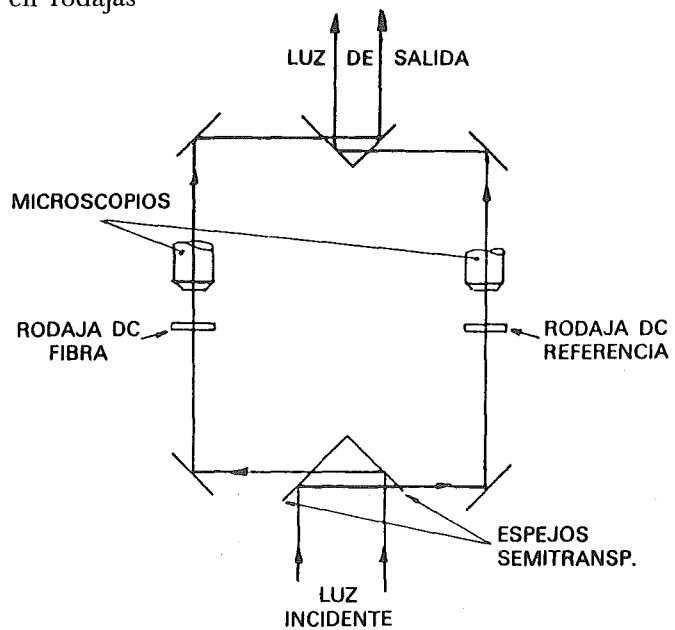
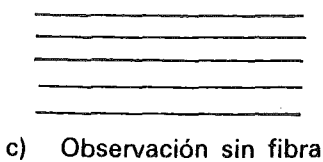
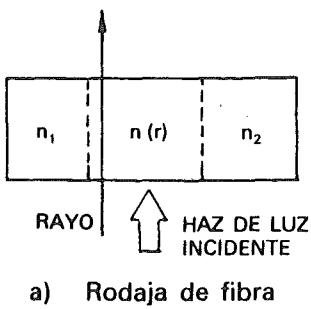
Un perfil ideal en una fibra multimodo permitirá anchos de banda cercanos a los 10  $\text{GHz} \cdot \text{Km}$ . Cualquier irregularidad en el perfil rebaja el ancho de banda permitido. Por estas razones es necesario conocer bien el citado perfil.

Algunos de los métodos utilizados son:

- Método del campo cercano transmitido.
- Método de reflexión.
- Método del campo cercano refractado.
- Método interferamétrico en rodajas.
- Método interferamétrico transversal.
- Método de enfoque.

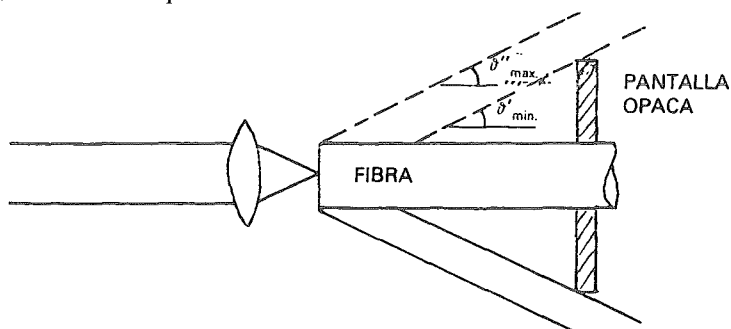
Veamos más detalladamente alguno de estos métodos.

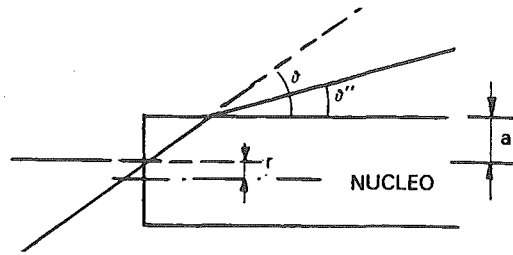
#### 4.1. Método interferométrico en rodajas



$$n(r) = n_2 + \frac{\lambda S(r)}{Dd}$$

#### 4.2. Método del campo cercano refractado





b) Trayectoria de los rayos

$$n(r) = n_2 + \cos O'' \min (\cos O'' \min - \cos O' \max)$$

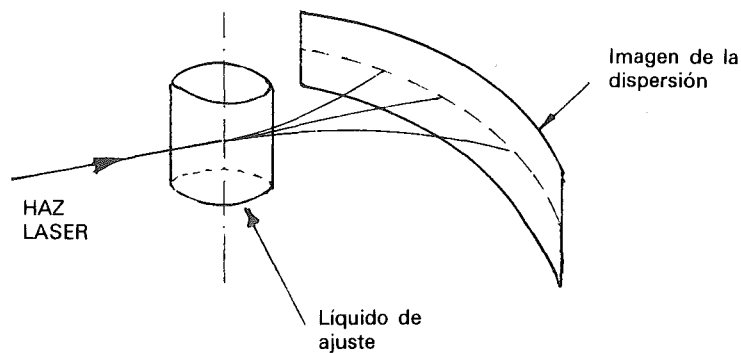
$$\frac{P(a) - P(r)}{P(a)}$$

$P(r)$  = luz detectada cuando se enfoca en  $r$

$P(a)$  = idem en  $a$  (frontera entre núcleo y cubierta)

Puede dar hasta 4 partes en  $10^{-3}$

#### 4.3. Método de dispersión hacia adelante

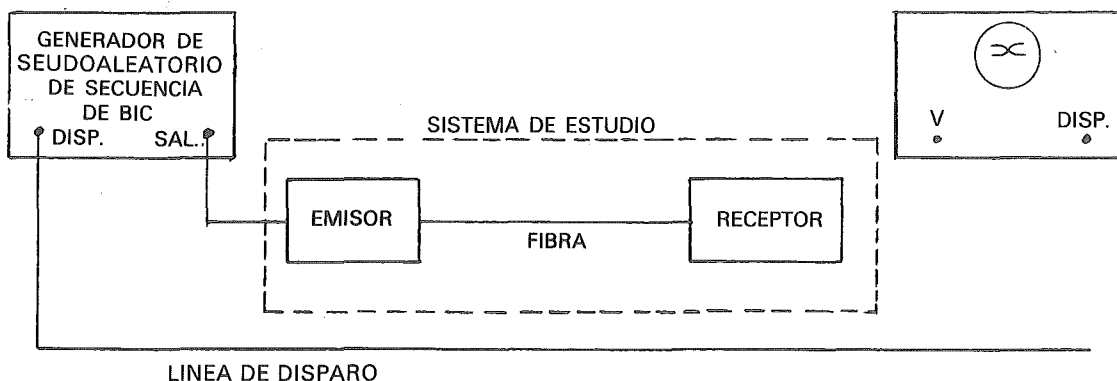


Este método es sencillo experimentalmente, pero es algo complejo en cuanto al procesamiento de datos se refiere.

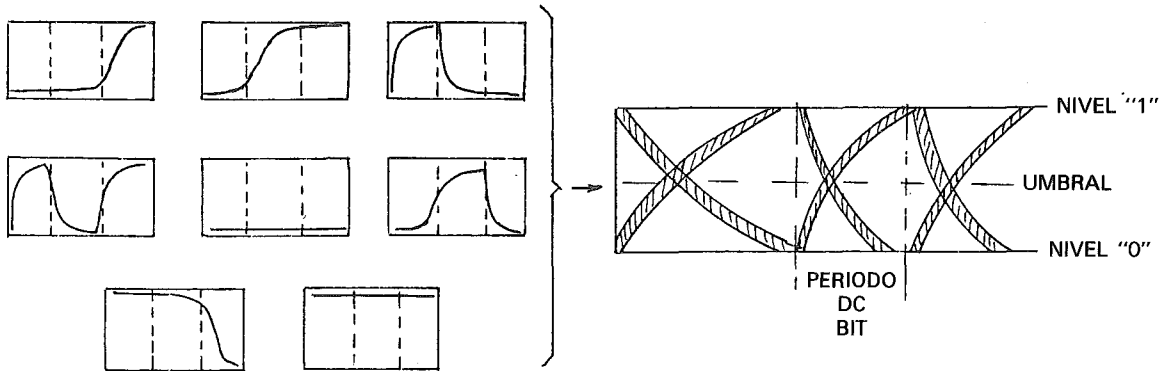
#### j) Diagrama de ojo

El diagrama permite la observación inmediata de la distorsión de la señal transmitida.

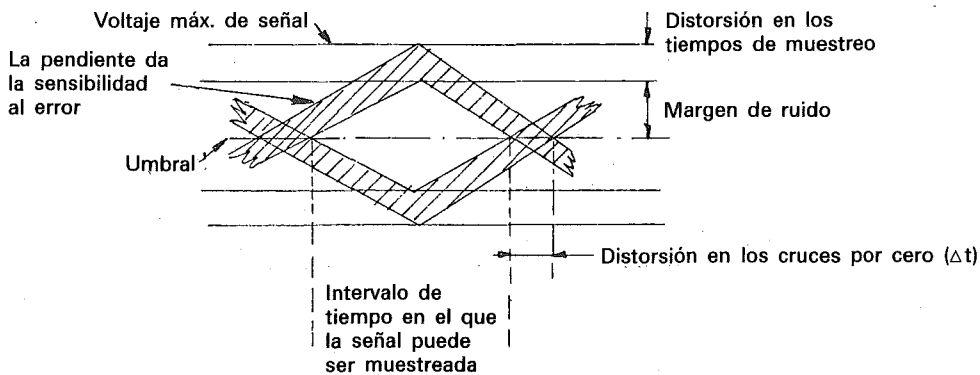
*Método de observación*



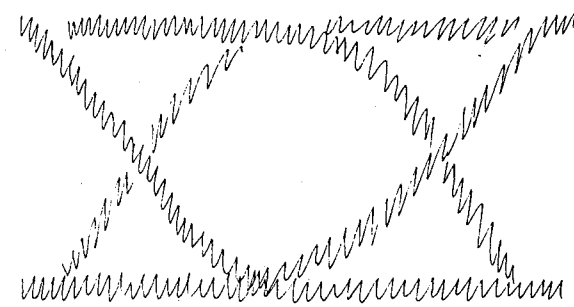
## RESULTADOS (ES)



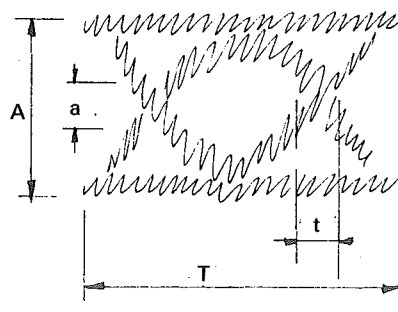
## INTERPRETACION



## DIAGRAMAS OBTENIDOS



a) Diagrama de sistema normal



b) Altamente degradado por limitación de ancho de banda.

### Síntesis de información

— La anchura del ojo define al intervalo de tiempo en el que la señal recibida puede ser muestreada sin interferencia intersímbolos. El mejor momento de muestreo es en el de mayor apertura del ojo.

— La altura de la apertura del ojo se reduce por la distorsión en amplitud de la señal.

La máxima distorsión viene dada por la distancia vertical entre la parte superior del ojo y el máximo nivel de la señal.

– El margen de ruido es el porcentaje de  $V_1$  a  $V_2$   
y es igual a  $\frac{V_1}{V_2} \times 100 \% = \frac{a}{A} \times 100 \%$

– La pendiente de los lados del ojo determina la sensibilidad del sistema o errores de timing aumenta cuanto más horizontal.

– El parpadeo (Sitte) del borde proviene del ruido en el receptor y de la distorsión en la fibra  $(E/T) \times 100 \%$ .

– Los tiempos de 10 y 90 % de subida y de bajada se pueden medir a partir de los niveles 0 y 100 de los ceros y los “unos”.

– Las no linealidades en la fibra dan un diagrama asimétrico.

### 3. EMISORES

#### a) Introducción

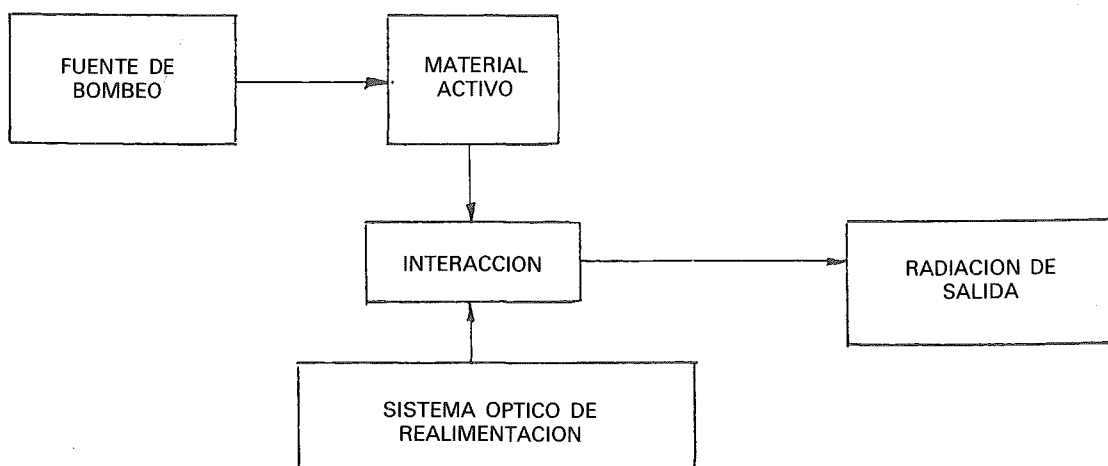
Cuando intentamos obtener el emisor más adecuado en las comunicaciones ópticas tratamos de disponer de una radiación:

- Monocromática.
- Coherente.
- De gran direccionalidad.

Para ello utilizaremos conjuntamente:

- 1) Las líneas de emisión de los sistemas atómicos.
- 2) Líneas de salida de los interferómetros de Fabry-Perot.

*Forma de hacerlo:*





Hay varias formas de realizar el estudio sobre emisores:

1) *Teoría clásica:*

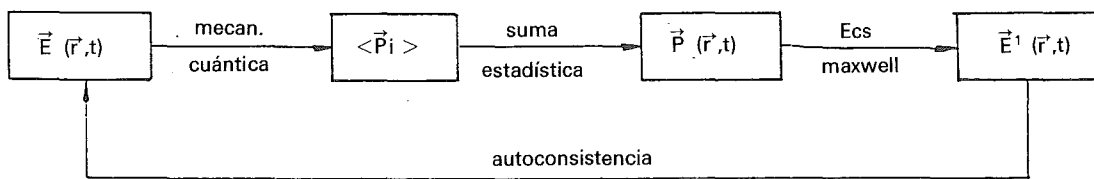
Basada en los campos electromagnéticos estudiados según las ecuaciones de Maxwell.

– El material es estudiado macroscópicamente.

– Las pérdidas en el resonador serán iguales a la ganancia. (Por conservación de la energía).

2) *Teoría semiclásica*

– Material compuesto de sistemas atómicos (Ec. de Schrödinger).



– Permite justificar la dependencia temporal de la intensidad, la atracción de modos y estudiar el trabajo multimodo (La teoría clásica no podía).

3) *Teoría Cuántica:*

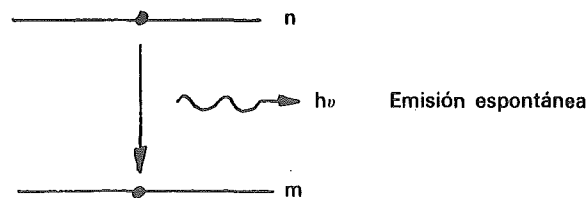
Es semejante a la teoría semiclásica, pero cuantifica el campo electromagnético.

Justifica la emisión espontánea y las fluctuaciones cerca del umbral.

b) **Interacción de un átomo de 2 niveles con una radiación**

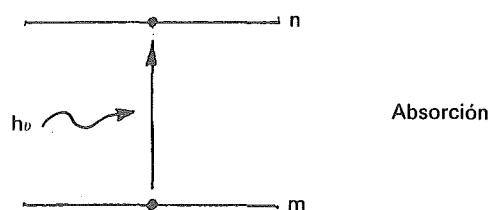
1) *Emisión espontánea:*

Se produce cuando un  $e^-$  pasa de un nivel de energía a otro de menor energía.



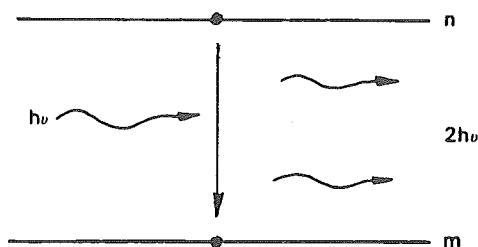
2) *Absorción:*

Un  $e^-$  absorbe energía de una radiación de modo que pasa de un nivel de energía a otro de energía superior.

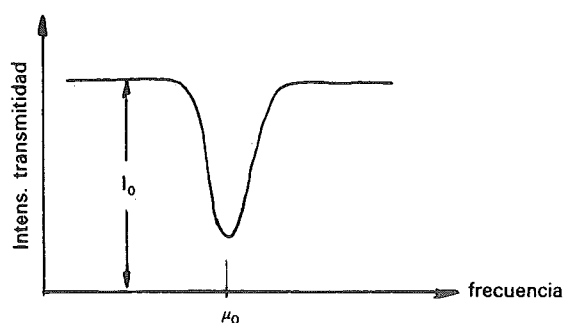


### 3) Emisión estimulada:

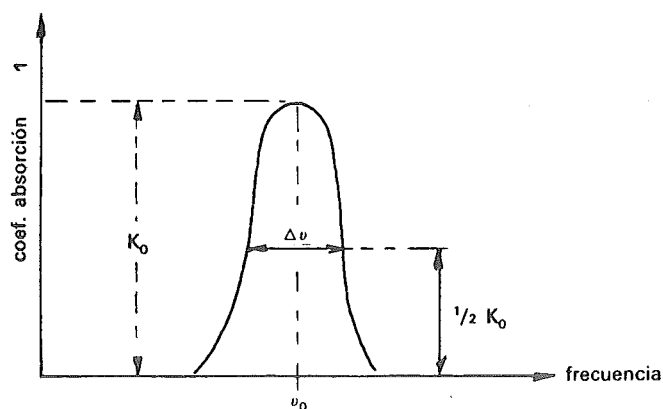
Se produce cuando una radiación está provocada por otra anterior. Gráficamente:



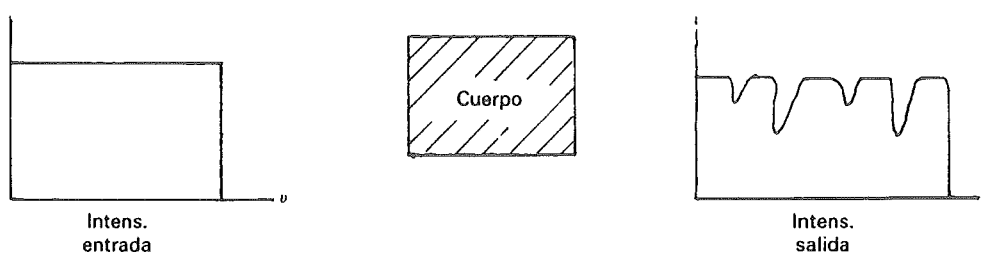
Veamos a través de la siguiente gráfica como varía la intensidad transmitida por el material según variamos la frecuencia.



A la vista de estos resultados podemos concluir que existe un coeficiente de absorción variable con la frecuencia y que podría tener la forma del siguiente gráfico:



Vemos que si introducimos una intensidad de entrada constante en las diferentes frecuencias en un cuerpo, la intensidad de salida será variable con la frecuencia:



### c) Concepto de emisión estimulada

#### COEFICIENTES A Y B DE EINSTEIN

Conceptos previos:

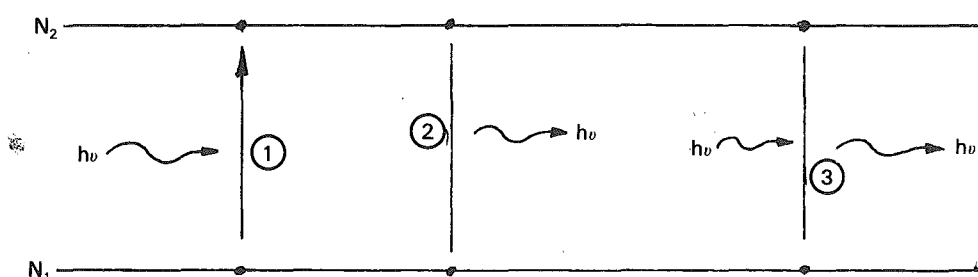
##### 1. Ley de Planck de radiación del cuerpo negro:

$$\rho(\nu) = \frac{8 \pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/KT} - 1}$$

##### 2. Distribución de Boltzmann:

$$N_a = N_i \cdot \exp(-h\nu_{12}/KT)$$

Veamos ahora cuáles pueden ser los procesos posibles entre 2 niveles:



(1) Es el llamado proceso de absorción:  $\rho(\nu) \cdot B_{1a} \cdot N_i$

(2) Proceso de *emisión espontánea*:  $A_{a1} \cdot N_a$

(3) Proceso de emisión estimulada:  $\rho(\nu) \cdot B_{a1} \cdot N_a$

En el equilibrio habrá de producirse que los procesos de emisión poseen juntos el mismo volumen que el proceso de absorción:  $(1) = (2) + (3)$

Con ello y empleando la ecuación de la distribución de Boltzmann llegamos a:

$$\rho(\nu) = \frac{A_{a1}}{B_{1a} \exp(h\nu_{12}/KT) - B_{a1}}$$

Si esta expresión la comparamos con la Ley de Planck llegaremos a las siguientes conclusiones:

$$B_{1a} = B_{a1} \text{ y } A_{a1} = \frac{8 \pi h \nu^3}{c^3} \cdot B_{a1}$$

$B_{a1}$  y  $A_{a1}$  son los coeficientes de Einstein. A través de estas expresiones podemos comprobar que conocido uno de ellos pueden obtenerse los otros dos.

Experimentalmente se ha observado que la vida media de un átomo excitado es:

$$dN_a(t) = A_{a1} \cdot N_a(t) \cdot dt \longrightarrow N_a(t) = N_{a0} e^{-A_{a1} \cdot t}$$

Por tanto:

$$N_a(t) = N_{a0} \cdot e^{-t/\tau} \text{ donde } 1/\tau = A_{a1}$$

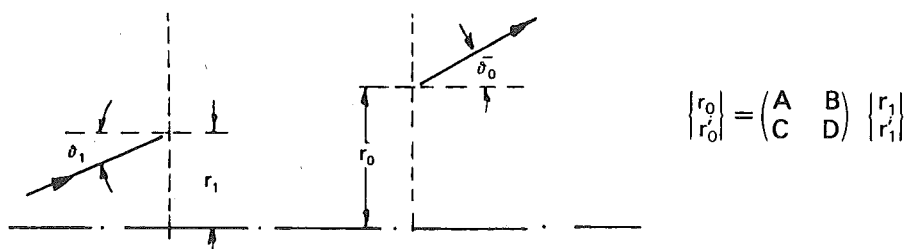
Por teoría clásica del láser llegamos finalmente a:

$$A = \frac{1/6 \cdot \hbar \cdot \omega^3 \cdot \gamma^2}{\pi \cdot \hbar^2 \cdot c^3 \cdot \epsilon^0}$$

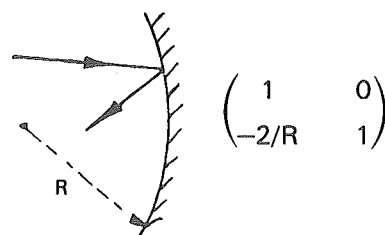
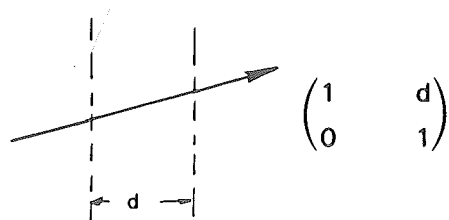
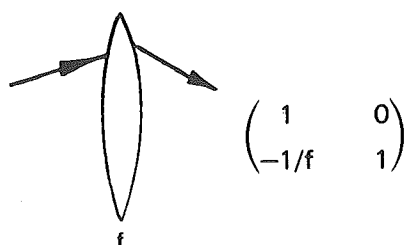
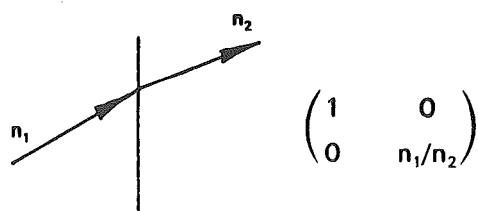
donde  $\gamma$  es la magnitud del elemento matricial del dipolo eléctrico ya que la dependencia de  $A$  con  $\omega^3$  es mucho más importante por emisión espontánea en frecuencias ópticas que a frecuencias de radio por ejemplo.

#### d) Resonadores ópticos

— Existe un método sencillo de estudiarlos: mediante la matriz de transferencia o matriz ABCD (que vale también para estudiar la propagación de rayos y haces en sistemas ópticos en condiciones paraxiales)



Ejemplos de sistemas simples:

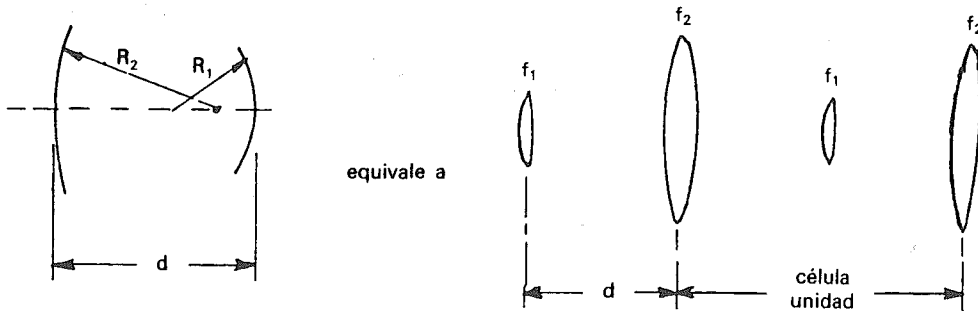


En general:

— La matriz de un sistema compuesto por varias partes es el producto de los de cada uno de ellas.

— El determinante AD-BC vale 1 cuando el índice de refracción de entrada es igual al de salida.

Veamos el caso de una cavidad formada por 2 espejos:

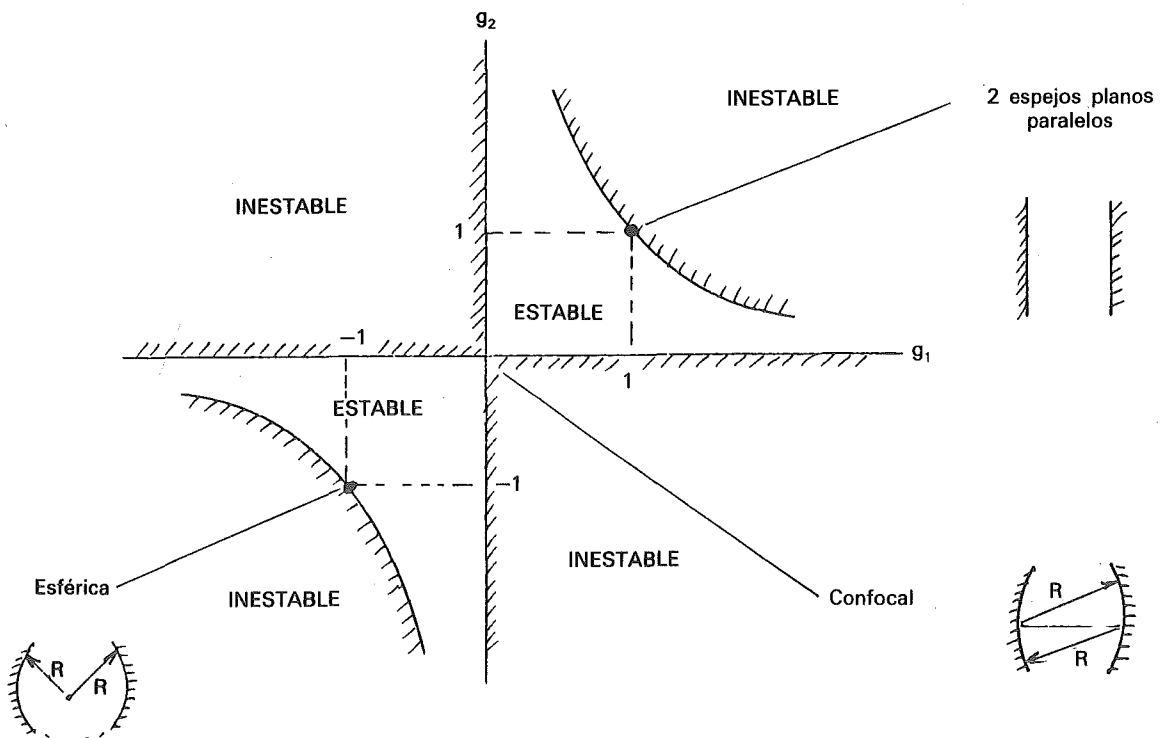


Para que este sistema *ESTABLE*, es decir, para que los rayos siempre se mantengan dentro, ha de verificarse:

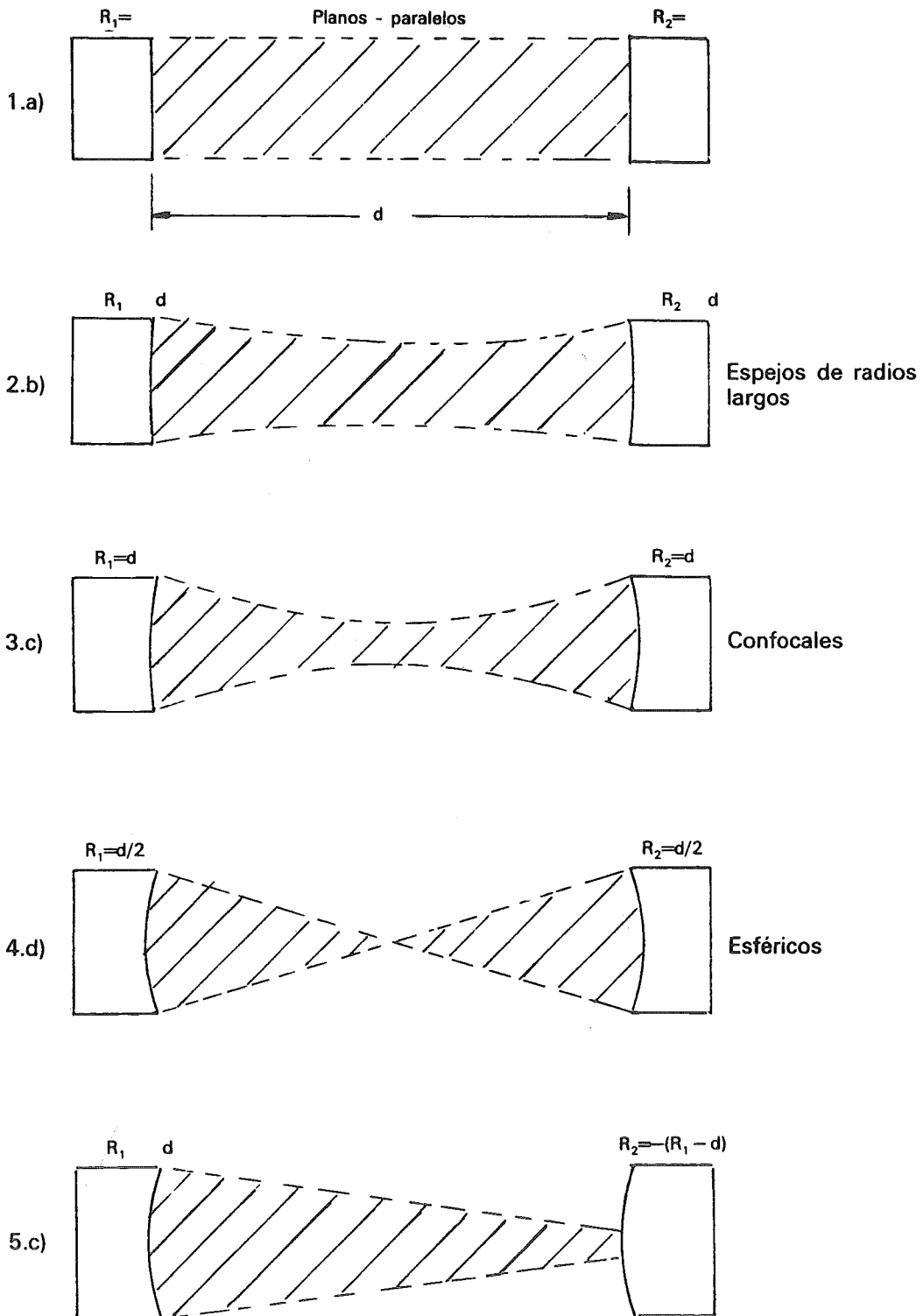
$$0 \leq \left(1 - \frac{d}{2f_1}\right) \left(1 - \frac{d}{2f_2}\right) \leq 1$$

Definiendo  $g = 1 - \frac{d}{R}$ , podemos dividir el espacio formado por  $g_1, g_2$  de la siguiente manera:

### DIAGRAMA DE REGIONES DE ESTABILIDAD

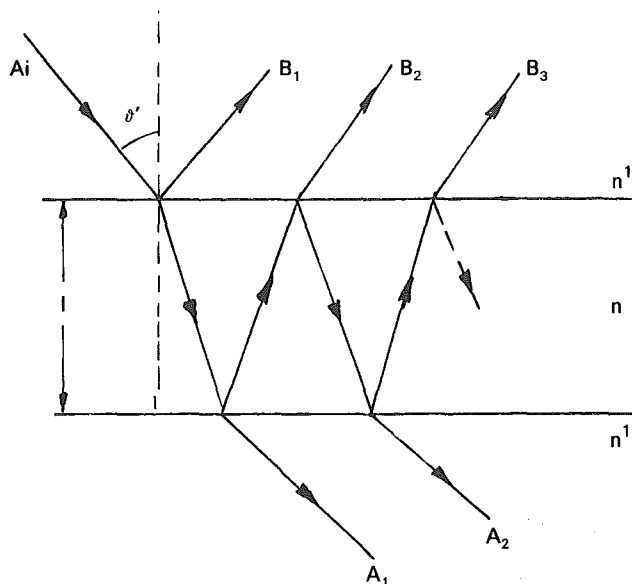


*Distribución de la densidad de energía en algunos resonadores específicos*



**e) Recordatorio de propiedades de un resonador Fabry-Perot**

Dado un rayo incidente sobre un medio con un ángulo  $\theta'$  se producirá un haz reflejado y otro transmitido:



$$A_r \equiv \sum B_i = \frac{(1 - e^{i\delta}) \sqrt{R}}{1 - R \cdot e^{i\delta}} \cdot A_i$$

$$\text{donde } \delta \equiv \frac{4 \pi n l \cos \vartheta}{\lambda}$$

$$A_t \equiv \sum A_i = \frac{T}{1 - R e^{i\delta}} A_i$$

Desfase en un camino de ida y vuelta.

$T \rightarrow$  transmitancia

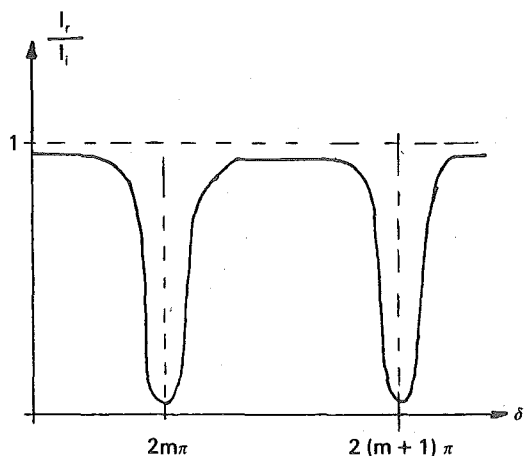
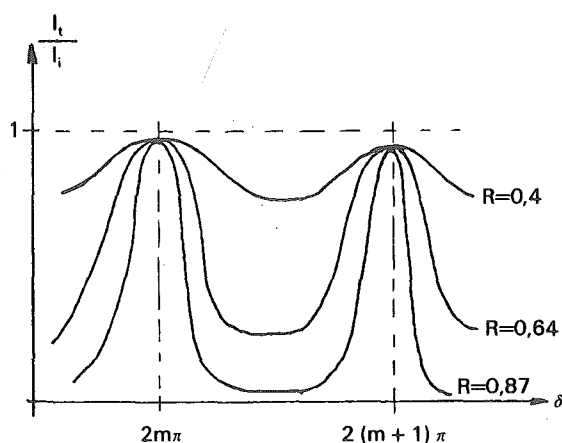
$R \rightarrow$  reflectancia

$$\frac{I_r}{I_i} = \frac{4R \sin^2 (\delta/2)}{(1 - R)^2 + 4R \sin^2 (\delta/2)} \quad \text{FRACCION REFLEJADA}$$

DE LA LUZ  
INCIDENTE

$$\frac{I_t}{I_i} = \frac{(1 - R)^2}{(1 - R)^2 + 4R \sin^2 (\delta/2)} \quad \text{FRACCION TRANSMITIDA}$$

Representemos ahora estas 2 fracciones reflejada y transmitida en función del parámetro  $\delta$ :



Las aplicaciones clásicas de interferómetro de Fabry-Perot han sido:

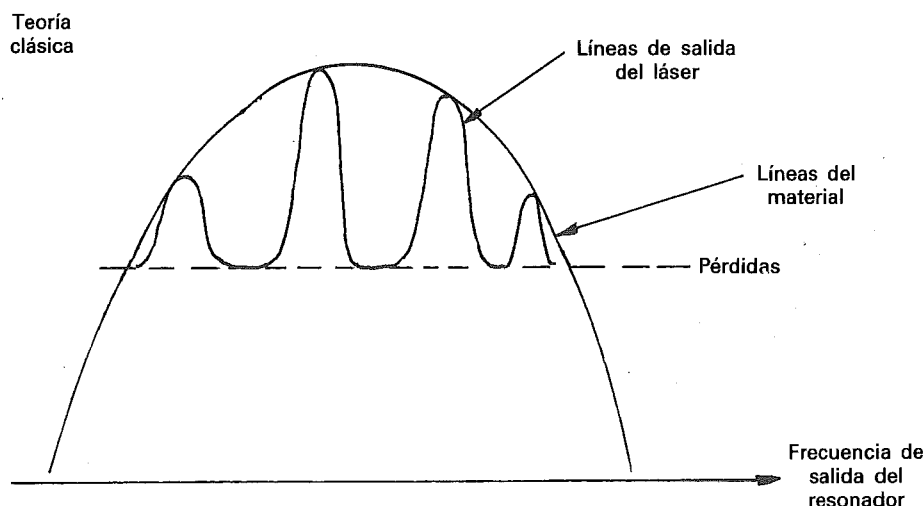
- Filtros de interferencia
  - Interferómetros
  - Cavidad láser
- } según varíe  $l$ ,  $\lambda$  ó  $n$ .

Puntos importantes a considerar:

- Los picos de  $\frac{I_t}{I_i}$  y los de  $\frac{I_r}{I_i}$  se hallarán más o menos separados dependiendo de "n" y de " " (longitud de onda con la que se incide). Esto se ve fácilmente fijándonos en la expresión de .

- Por otro lado los picos serán tanto más apuntados cuanto mayor sea la reflectancia, de tal modo que podemos considerar que el medio actúa como un filtro de determinadas longitudes de onda.

Imaginemos tener una cavidad láser: 2 espejos paralelos entre los que se ha introducido un determinado material con unas características concretas en cuanto a índice de refracción y anchura.

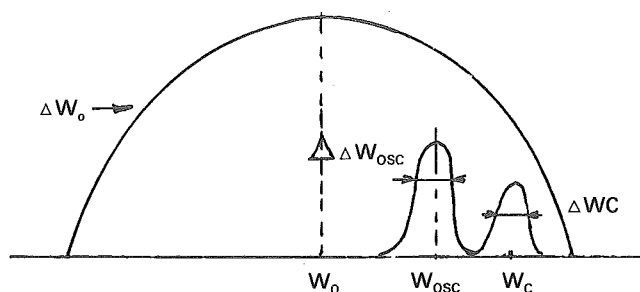


La línea del material indica la característica de salida del material en frecuencias cuando aún no ha sido sometido a ningún interferómetro.

Tras ser sometido a un interferómetro se producen las líneas de salida del láser que seleccionarán unas determinadas frecuencias. La separación de dichas frecuencias dependerán, como ya sabemos, del índice de refracción del medio (que supondremos de momento constante) y de la anchura de la cavidad.

En la realidad sin embargo, se van a producir otros efectos como la temperatura, que aún no hemos tenido en cuenta:

REALIDAD





Las expresiones que se obtienen para este fenómeno son:

$$W_{asc} = \frac{(\omega_o / \Delta W_o) + (W_c / \Delta W_c)}{(1 / \Delta W_o) + (1 / \Delta W_c)}$$

$$W_{osc} = \frac{4 h W_{osc} \cdot (\Delta W_c)^2}{P} \quad P \rightarrow \text{potencia de salida}$$

Veamos un ejemplo:

$$\left. \begin{array}{l} S_i \frac{\Delta W_c}{2} \cong 10^7 \text{ Hz} \\ P \cong 1 \text{ mW} \end{array} \right\} \rightarrow \frac{\Delta W_{osc}}{W_{osc}} \cong 10^{-15}$$

\* De aquí se infiere que la monocromaticidad viene determinada más por vibraciones de la cavidad y por efectos térmicos que por el propio material (que parecía ser tan importante según la teoría clásica).

Ej.: Un  $\Delta T$  contribuye a  $\Delta W_{osc}/W_{osc}$  según la siguiente ley:

$$(\Delta W_{osc}/W_{osc}) = \alpha \cdot \Delta T$$

$$\text{Si } \alpha \cong 10^{-7}/^\circ\text{K} \rightarrow \Delta W_{osc}/W_{osc} = 10^{-7} \Delta T$$

Este hecho se denomina “desplazamiento de frecuencias” que en inglés se llama “frequency pulling”.

#### Requisitos de los emisores en comunicaciones ópticas

Propiedad	Requisito	Objetivo
– Longitud de onda principal	Que se encuentre en la zona de bajas pérdidas y dispersión	0,85 $\mu\text{m}$ ; 1,3 $\mu\text{m}$ ; 1,6 $\mu\text{m}$ .
– Fiabilidad	Vida larga y estabilidad en Trabajo: salida de características fijas	Vida = $10^6$ h.
– Potencia	Debe satisfacer las demandas del sistema	> 1 mW
– Eficiencia	Debe operar con baja potencia eléctrica y bajo voltaje; poco calor generado	> 10 %

#### Requisitos de los emisores en comunicaciones ópticas

Propiedad	Requisito	Objetivo
– Anchura espectral (coherencia temporal)	Debe ser tal que permita la máxima anchura de onda de la fibra	El margen de long. de onda en el que trabajamos debe ser lo más estrecho posible.
– Enfoque (coherencia espacial)	Que posibilite la máxima potencia en la fibra. Fáciles de enfocar	
– Modulación	Directa o facilidad para	
– Tamaño y peso	Pequeño y ligero	
– Coste	Producción en masa y bajo coste	

El láser que mejor se adapta a todas estas condiciones es el *LASER SEMICONDUCTOR*

# EMISORES OPTICOS

0,85  $\mu\text{m}$ .

1,0 - 1,7  $\mu\text{m}$ .

	LED Al Ga As	LD Al Ga As	LASER SOLIDO Nd <sup>3+</sup> , YAG	LED Ga In As P	LD Ga In As P
— Bombeo	Corriente	Corriente	Optico	Corriente	Corriente
— Long. onda ( $\mu$ )	0,75-0,9	0,75-0,9	1,06	0,9-1,7	0,9-1,7
— Anchura espectral (nm)	35	3	< 0,1	120	3
— Potencia de salida (mw)	1	5	5	1	5
— Eficiencia de acoplo (con fibra óptica)	% pequeño	50 %	100 %	10-20 %	50 %
— Modulación	Directa	Directa	Externa	Directa	Directa
— Ancho de banda	200 Mbits/seg.	1 Gbit/s.	Algunos Gbits/s.	100 Mbits/s.	200-300 Mbits/s.
— Ancho de potencia	% pequeño	% pequeño	< 1 %	% pequeño	% pequeño

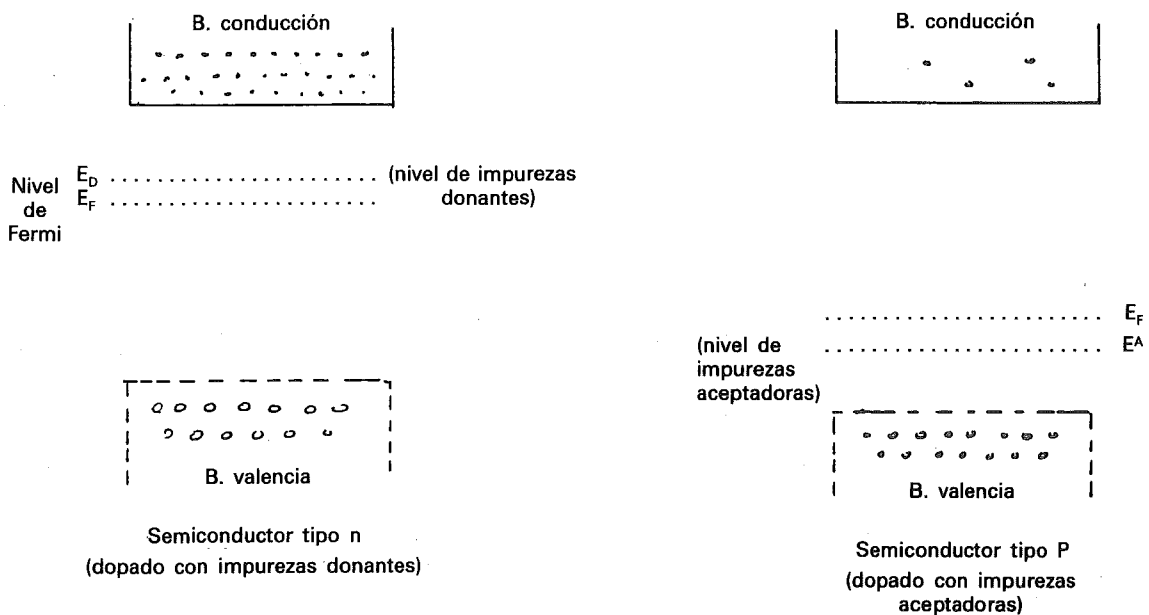
En el cuadro anterior LED significa "Light Emiting Diode" o diodo de luz y LD significa diodo láser.

Sería conveniente comparar los dos últimos cuadros mostrados para ver cuál debe ser el modelo que mejor se ajuste a los requisitos fijados. Llamamos la atención sobre el láser sólido dopado con  $\text{Nd}^{3+}$  que se ajusta bastante bien a la mayor parte de los requisitos.

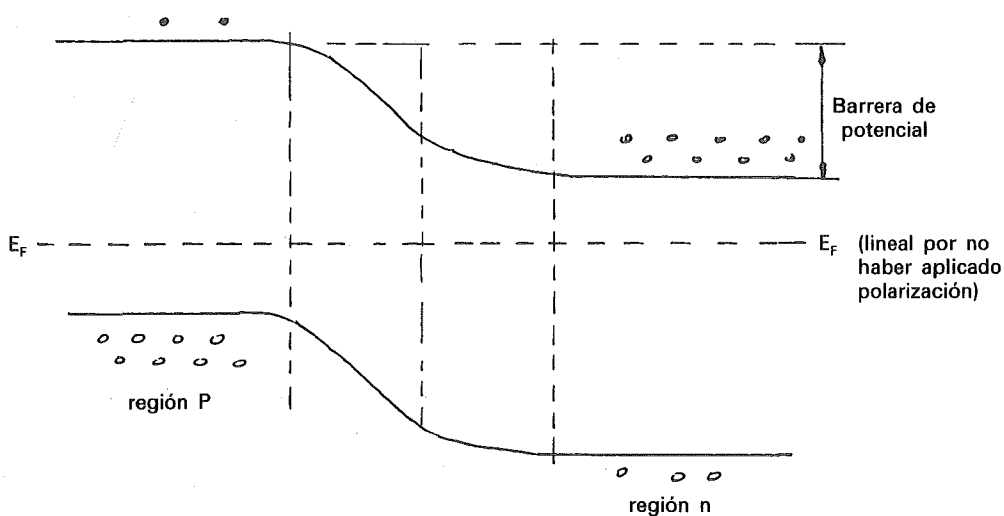
El cuadro anterior únicamente ha hecho referencia a los láser de semiconductor puesto que son éstos los que mejor verifican las condiciones que se les exigen.

## f) Emisión óptica en semiconductores

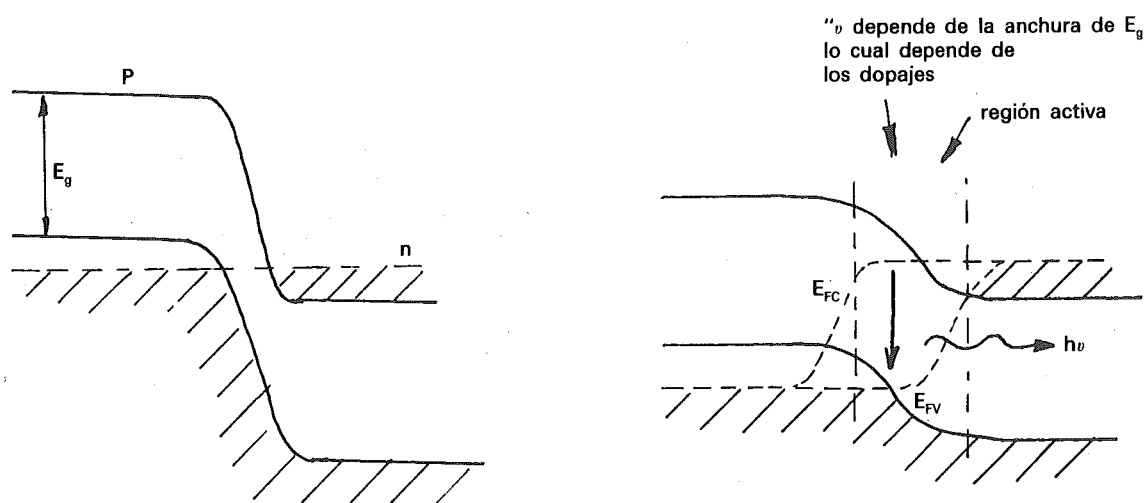
### 1. Diagrama de bandas



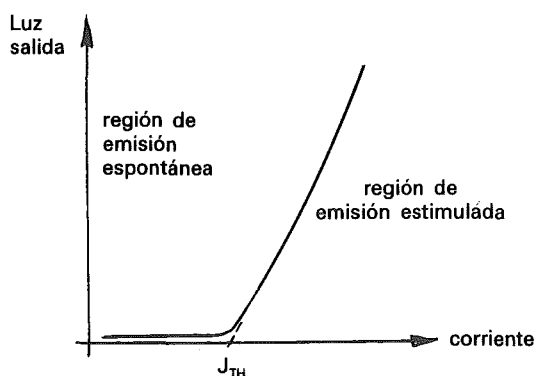
### 2. Diagrama de bandas en unión p-n



### 3. Emisión en uniones degeneradas



### 4. Corriente — radiación:



$$J_{TH} = \frac{1}{\beta} \left[ \alpha + \frac{1}{2\gamma} \alpha n \frac{1}{r_1 \cdot r_2} \right]$$

donde...

- $\beta \rightarrow$  cte. 1. depende del dispositivo
- $r_1, r_2 \rightarrow$  reflectividades de los espejos
- $\alpha \rightarrow$  longitud de la cavidad
- $\alpha \rightarrow$  coef. de pérdidas

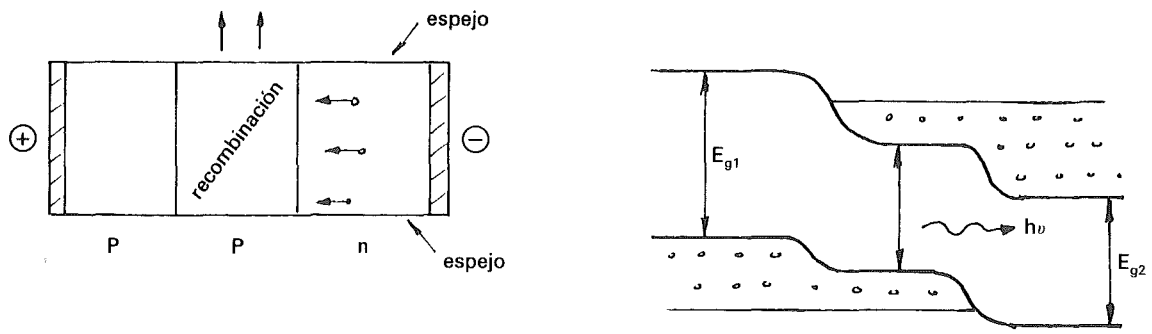
### 5. Heterouniones:

Las heterouniones no son sino interfases entre dos monocristales de semiconductores con diferentes  $E_g$  (diferentes gaps).

Son: Isotipo (n-n ó p-p) y  
Anisotipo (p-n)

Las isotipo logran crear una barrera potencial para confinar minoritarias en una pequeña región activa.

Las anisotipo mejoran la inyección de electrones o huecos.

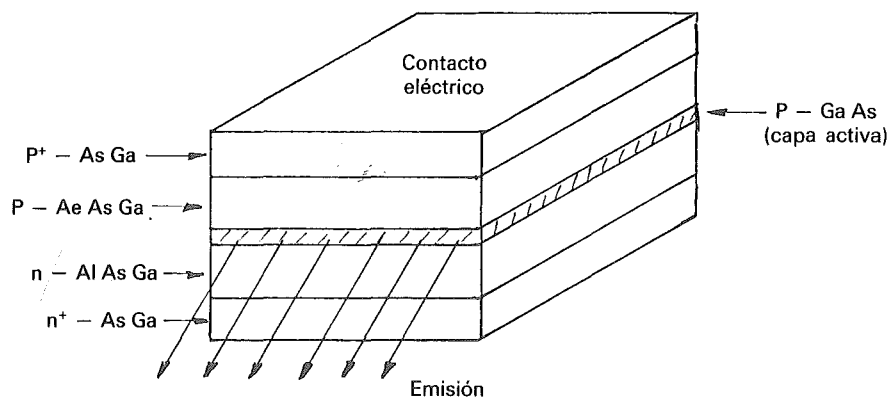


En la figura podemos observar una doble heterounión (DH)

### 6. Geometría de tira

La estructura DH confina la emisión en una única dirección, pero el laseado ocurre en todo un plano. Esto va a plantear una serie de problemas como son dificultad de refrigeración y laseado de múltiples filamentos. Además, la luz de salida es difícil de acoplar a la fibra por su geometría. (Problema difícilmente solventable mediante la utilización de una lente).

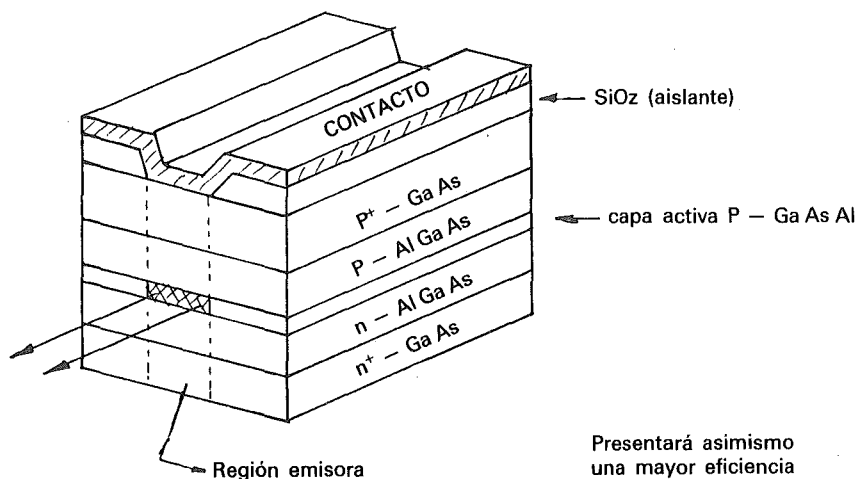
#### Situación discreta



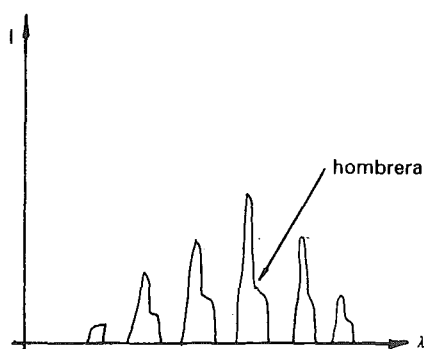
La solución que se plantea ante los inconvenientes mostrados es la de confinar la región activa al centro de la capa mediante una geometría de tira.

Inconveniente: la luz no aparece bien colmada pues la emisión se realiza a partir de una reducida área. Ventaja adicional: Conseguiremos rebajar la corriente umbral.

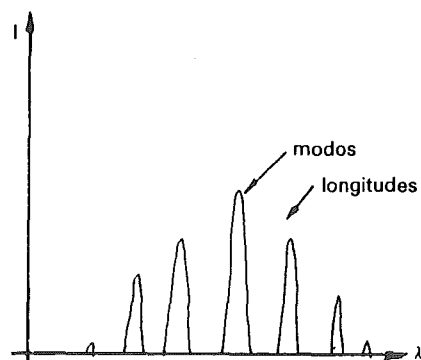
## Geometría de tira



Este modelo, con algunas modificaciones es el más usado en las comunicaciones ópticas.



Emisión de láser con superficie amplia de emisión. Los subpicos se deben a modos transversales horizontales de orden superior.

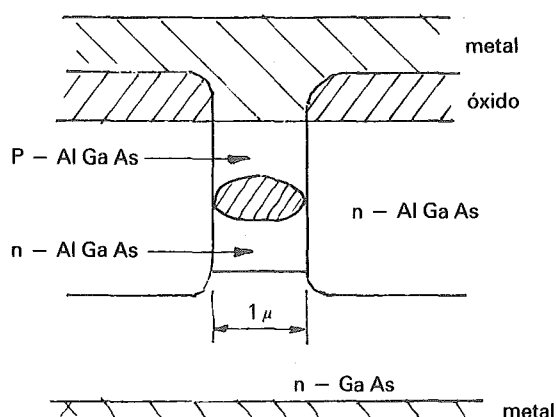


Emisión a partir de una geometría de tira. Hemos conseguido que desaparezcan las hombros.

## 7. Heteroestructuras enteradas: darán lugar a estructumonomodo

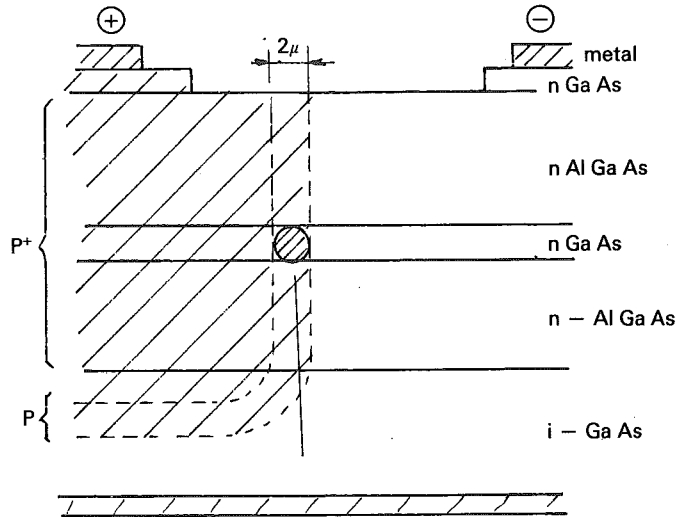
Además de realizar una tira, se hace una guía con lo cual confina más la región activa.

con lo que aún se



a) Estructura BH de Ga As/A Ga As (BH)

- corriente umbral  $\leq 10$  m
- Ancho de banda  $\sim \text{GHz}$
- Cw: pot  $< 1$  mw
- Vida media  $> 2.000$  horas ( $70^\circ \text{C}$ )
- Divergencia del haz ( $40\text{-}50^\circ \text{C}$ )

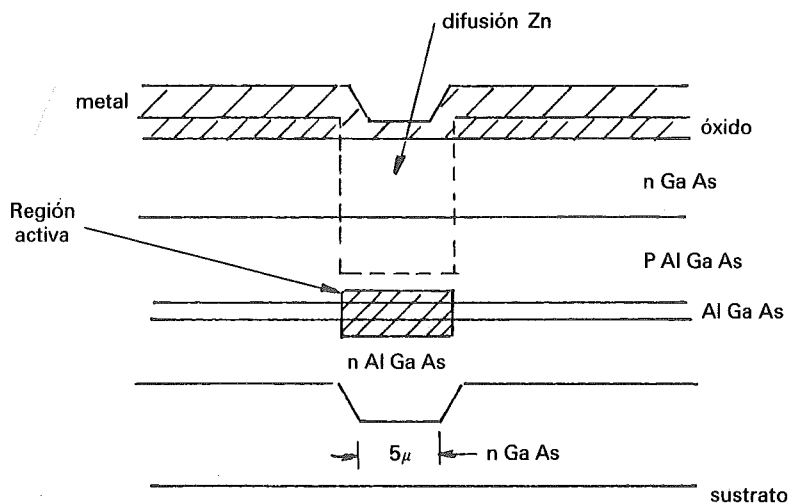


b) Láser de tira de unión transversal (TJS)

- Corriente umbral  $\leq 20$  m. A
- Cw: Pot  $\approx 3$  mw
- Vida media:  $10^6$  horas ( $T_{amb.}$ )
- Fuerte dependencia de  $I$  umbral con la temperatura

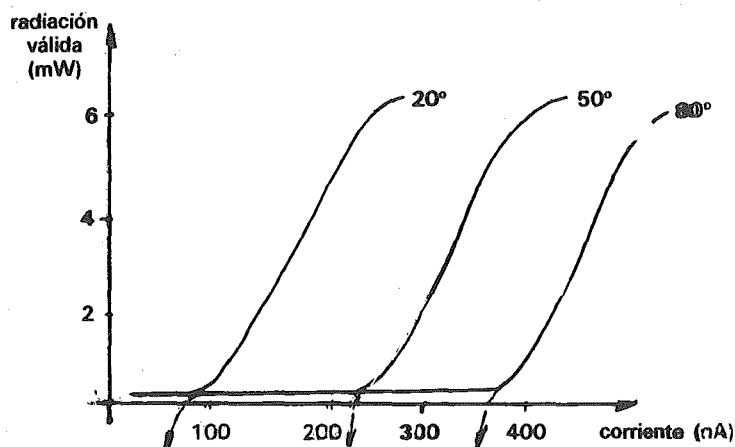
8. Láseres de sustrato en canal

Hay diferentes configuraciones. Unicamente presentamos aquí la configuración plana:



## g) Características de los láseres de semiconductores

### 1. Dependencia de la corriente umbral con la temperatura



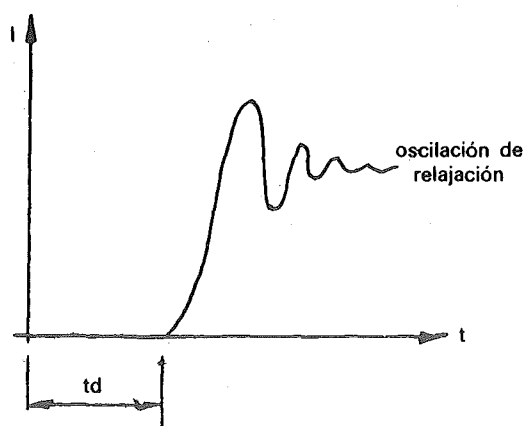
Vemos la dependencia de la radiación de salida con la corriente y la temperatura.

$J_{th}$  depende de  $e^{T/T_0}$

$$T_0 = \begin{cases} 120-190^\circ \text{ K para Al Ga As} \\ 40-75^\circ \text{ K para In Ga As P} \end{cases}$$

Conviene valores altos de  $T_0$  para que variaciones de temperatura no afecten mucho a la radiación de salida.

### 2. Respuesta dinámica



Ante una corriente de entrada en escalón, aparece un retraso  $t_d$  y unas oscilaciones de relajación ( $R_o$ ).

$t_d$ : reduce polarizando cerca del umbral.

$R_o$ : depende de la estructura del dispositivo y las condiciones de trabajo. Difícil de eliminar.



### 3. Autopulsaciones

Se observan trabajando en corriente continua. Son debidas al envejecimiento y a la calidad del dispositivo.

Se producen en el margen de 0,2 a 4 GHz.

Pueden ser reducidas por métodos externos (inyección óptica, realimentación por espejo externo y cambios en la reactancia del circuito de excitación). Estos métodos son puramente electrónicos.

### 4. Ruido

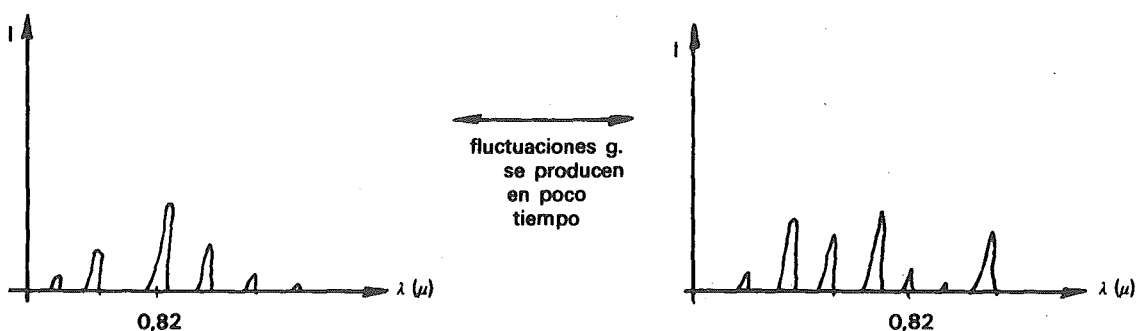
Tiene diversas posibles fuentes: ruido cuántico, reflexión de la luz de salida al dispositivo, ruido de partición, inestabilidades.

Las tres últimas fuentes se reducen con aisladores ópticos y dispositivos estabilizados en sus modos.

Para la frecuencia de trabajo  $< 100$  Hz el ruido cuántico (intrínseco) es pequeño.

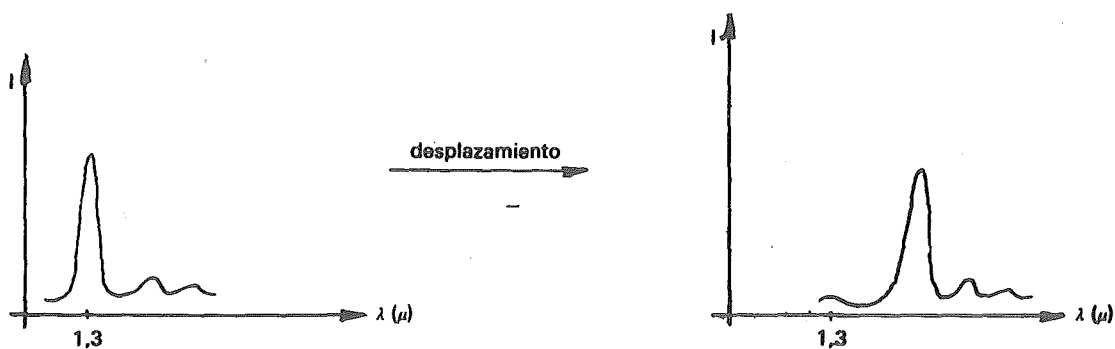
El ruido de partición implica la existencia de una inestabilización en los modos debido a cambios de temperatura.

Está referido a láseres multimodo.



### 5. Salto de modos

En láseres monomodo. Es un salto a mayores según se incrementa la corriente (encima de  $I_{th}$ ). No es continuo por causas térmicas.



## 6. *Fiabilidad*

Puede haber 2 tipos de degradaciones: catastrófica y gradual. En la actualidad puede ser fiable durante  $10^6$  horas en corriente continua. Sin embargo, ésta se trata de una consideración optimista pues el láser suele trabajar en régimen de pulsos.

También existe un límite en frecuencia. Suele ser muy alta y se denomina frecuencia de resonancia. Sin embargo, antes de llegar a su valor se pueden producir pulsaciones espúreas.

Veremos seguidamente distintos tipos de láseres utilizados, como son:

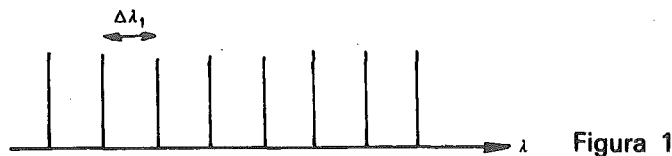
- Láser de cavidades acopladas
- Láseres de pozo-cuántico
- Láseres monofrecuencia

### h) **Láser de cavidades acopladas**

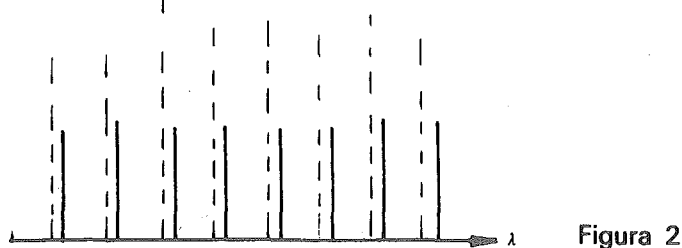
Se usa principalmente en la zona de 1,55 m.

#### 1. *Mecanismo de selección de modos*

El láser posee 2 resonadores Fabry-Perot. El primero de ellos realiza una selección de modos previa que supondremos tal que la siguiente:

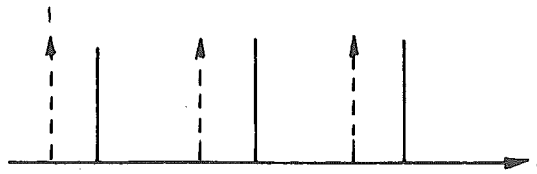


El segundo Fabry-Perot realiza una segunda selección de modos:

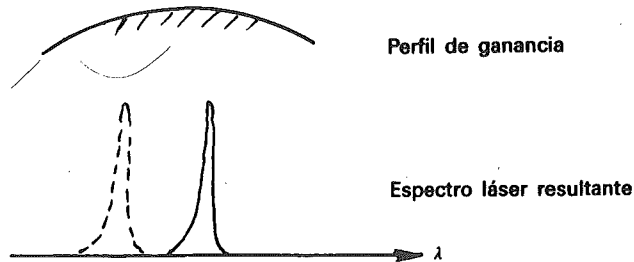


En la figura 2 hemos formado dos series de selección de modos (uno a rayas y otro con trazo continuo). Se ha realizado así para mostrar la posibilidad real que existe de desplazar los modos. Esto se consigue variando el índice de refracción lo cual se logra aplicando una corriente al semiconductor.

El 2.º Fabry-Perot actúa sobre la salida del primero, de forma que la salida del láser dada por el perfil coincidente de los modos del sistema acoplado:



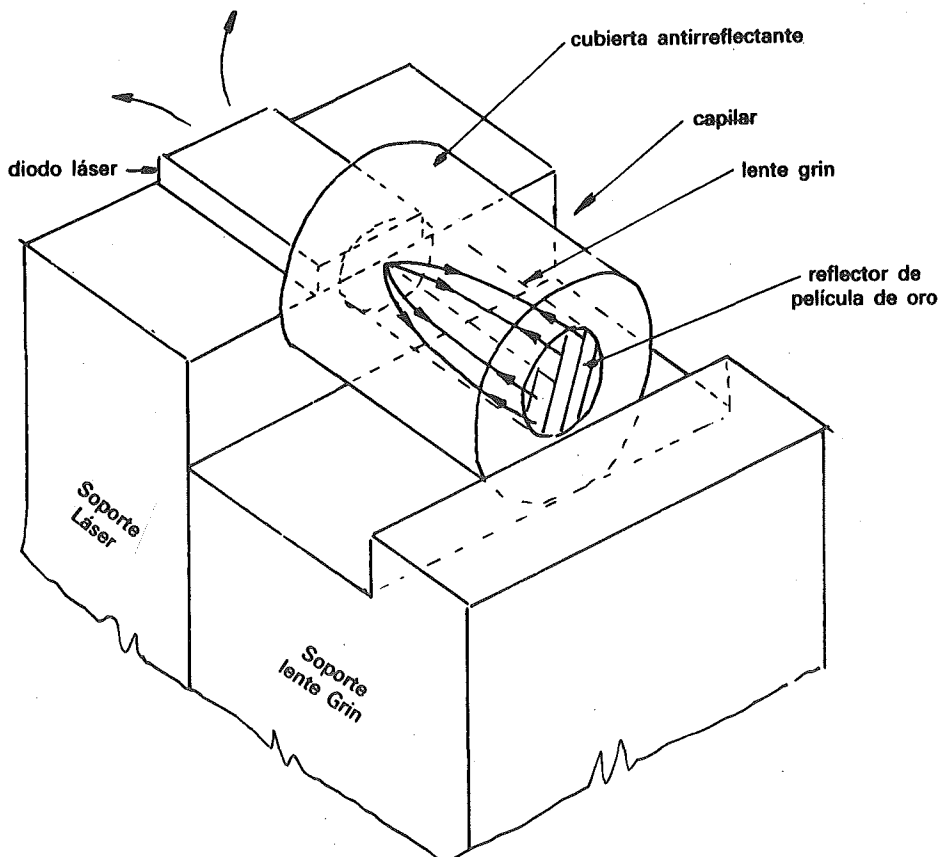
Ahora superponiendo esta salida al perfil de ganancia del material:



Vemos que hemos conseguido seleccionar un modo y además que éste puede sintonizarse a través del mecanismo de variación del índice de refracción.

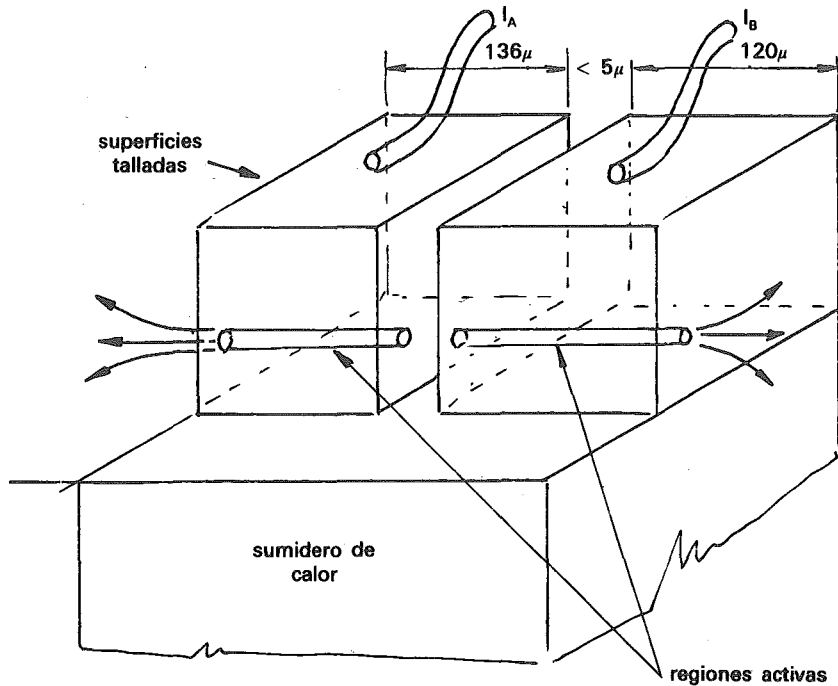
## 2. Esquemas empleados

### 2.1. Configuración activa-pasiva



Esta es una posible forma de selección de modos.

## 2.2. Configuración *activa-activa*



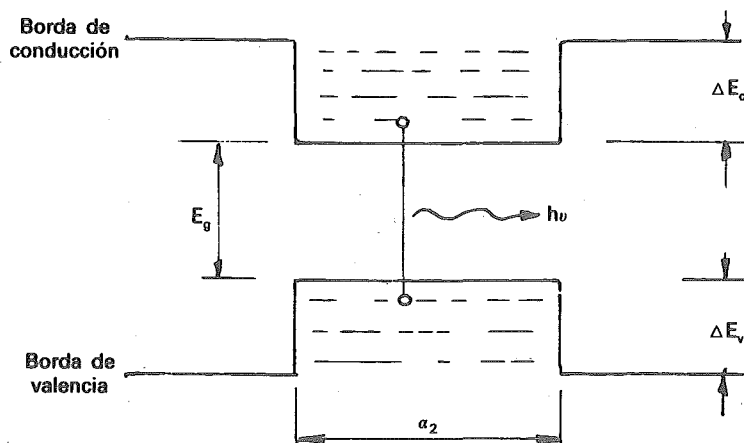
Esta configuración da lugar a la posibilidad de sintonía. Se denominan láseres  $C^3$  (cleaved-coupled-cavity).

La sintonía puede alcanzar un margen de 20 nm. con saltos de 2 nm. (puesto que vamos de pico a pico no hay posibilidad de sintonizar de forma continua).

### i) Láseres de pozo cuántico (Quantum-well LASERS)

Son láseres de doble heteroestructura con una capa activa de unos 10 nm. de espesor. El movimiento de electrones y huecos es perpendicular a dicha capa y queda restringido a ella. La energía cinética está cuantificada como el pozo cuántico en mecánica cuántica.

#### 1. Niveles de energía

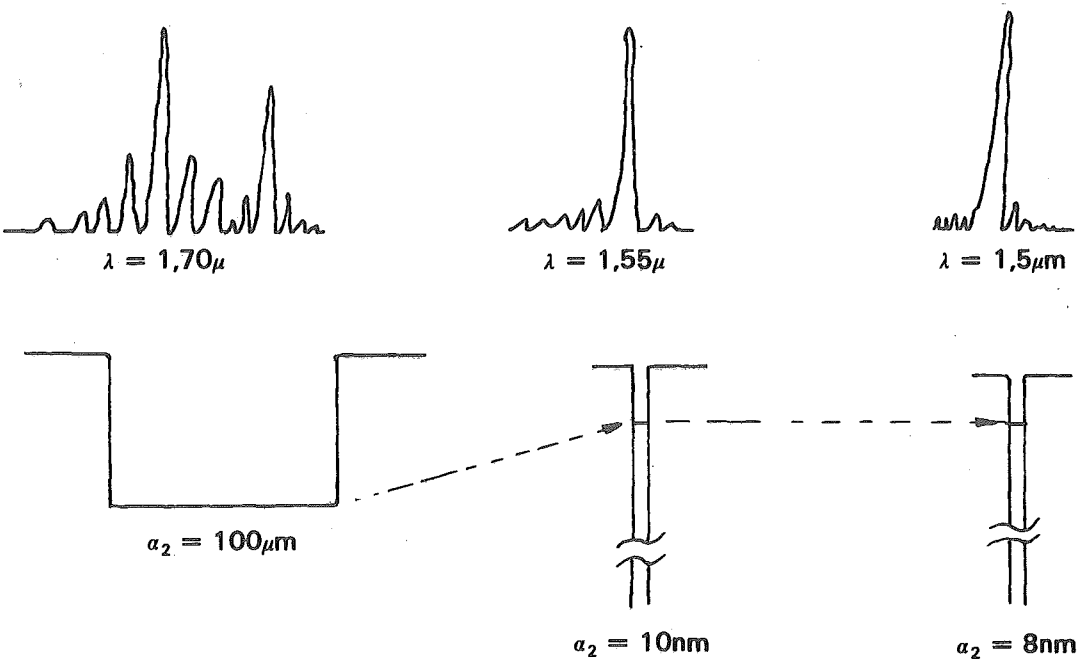


Confinamos los portadores en una región muy pequeña. La recombinación tiene lugar con intensidades más bajas.

La energía del fotón emitido puede variarse modificando la anchura del pozo  $L_2$ . La ganancia óptica es mayor que en los otros láseres para igual corriente.

## 2. Resultados

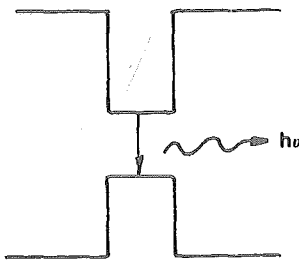
Vemos distintos resultados para distintos valores de  $L_2$ . Observamos cómo el pico se desplaza a regiones de mayor energía (menores  $\lambda$ ) al disminuir la anchura del pozo.



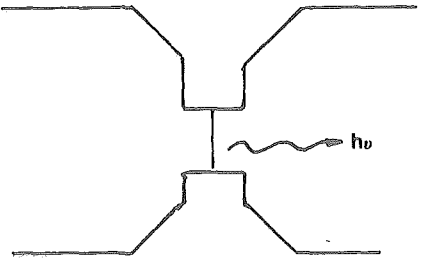
## 3. Tipos de láseres de pozo cuántico

Estos láseres serán muy importantes en un futuro próximo. Veamos los diagramas de bordas de los más usuales:

### 3.1. Láseres de pozo cuántico simple (SQW)



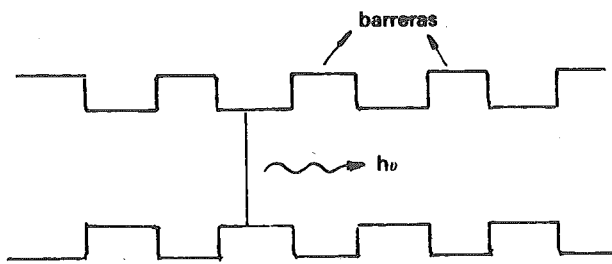
a) Pozo cuántico simple



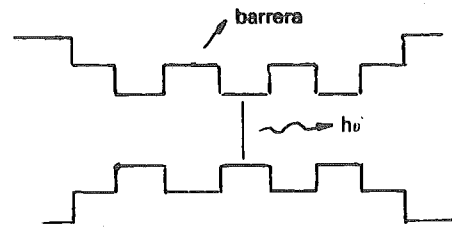
b) Pozo cuántico simple de índice gradual

La ventaja que introduce el b) frente al a) es que posee un mayor índice de confinamiento con lo que se reduce la corriente umbral. Esta ha llegado a poseer un valor de  $200\text{ A/cm}^2$ .

### 3.2. Láseres de pozo cuántico múltiple (MQW)



c) Pozo cuántico múltiple



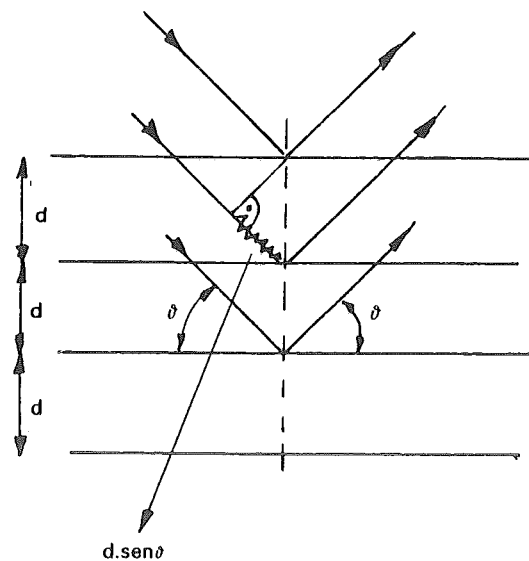
d) Pozo cuántico múltiple modificado

#### 4. Ventajas para comunicaciones ópticas:

- Menor corriente umbral
- Menor dependencia de la temperatura
- Menor chirp.

#### j) Dependencia de las reflexiones de Bragg

Introduciremos ahora un concepto ya clásico de física, el de las reflexiones de Bragg.

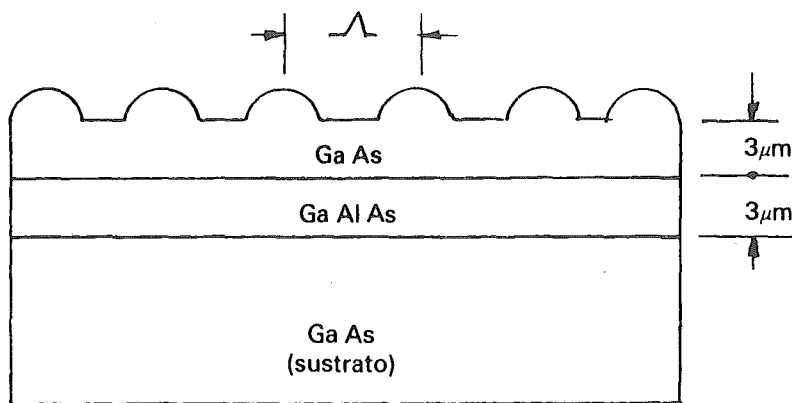


Se trata de un fenómeno de difracción de rayos X al paso a través de una malla cristalina.

Las reflexiones verificarán de acuerdo con la ley de Bragg las siguientes relaciones:

$$2d \cdot \sin \theta = l \cdot \lambda \text{ donde } l = 1, 2, 3, \dots$$

Nosotros llevaremos este fenómeno a un caso particular: aquél para el cual se produce una reflexión total de  $180^\circ$ . Lo aplicaremos al siguiente dispositivo:



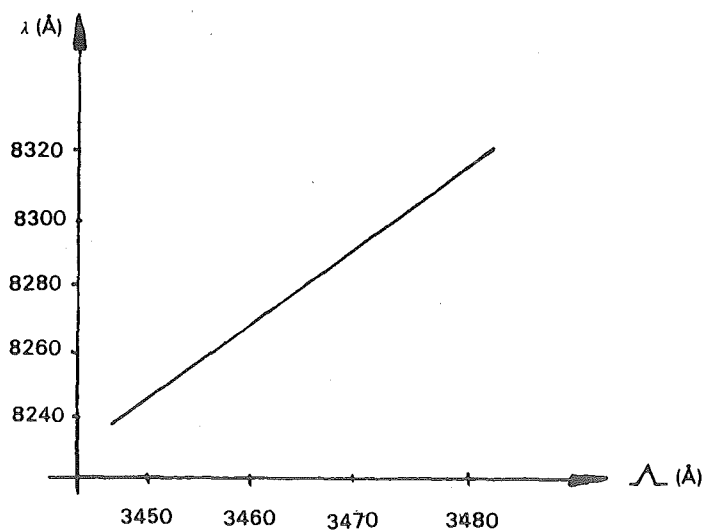
Vemos que  $d = \lambda/2$ ; Para  $\lambda = \lambda_0/ng$  y  $\vartheta = 90^\circ$ :

$$2 \cdot \lambda/2 = l \cdot (\lambda_0/ng) \text{ para } l = 1, 2, 3 \dots$$

o lo que es lo mismo, la  $\lambda_0$  ( $\lambda$  en el vacío) que se refleja  $180^\circ$  es:

$$\lambda_0 = \frac{2 \cdot \lambda \cdot ng}{l} \text{ donde } ng \text{ es el índice de refracción de la guía.}$$

Sólo un valor de  $l$  (usualmente 3) dará un  $\lambda$  que se encuentre dentro de la zona de ganancia del láser.



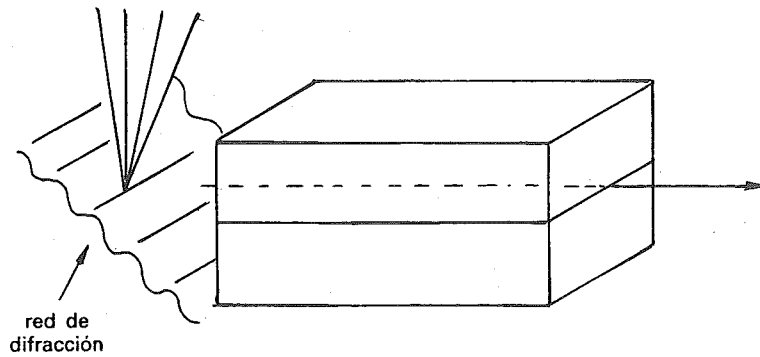
La electricidad conseguida en la  $\lambda$  es del orden de 0,5 a 0,8 Å.

Esta selectividad es mayor que la conseguida en cualquier otro dispositivo.

#### k) Láseres monofrecuencia

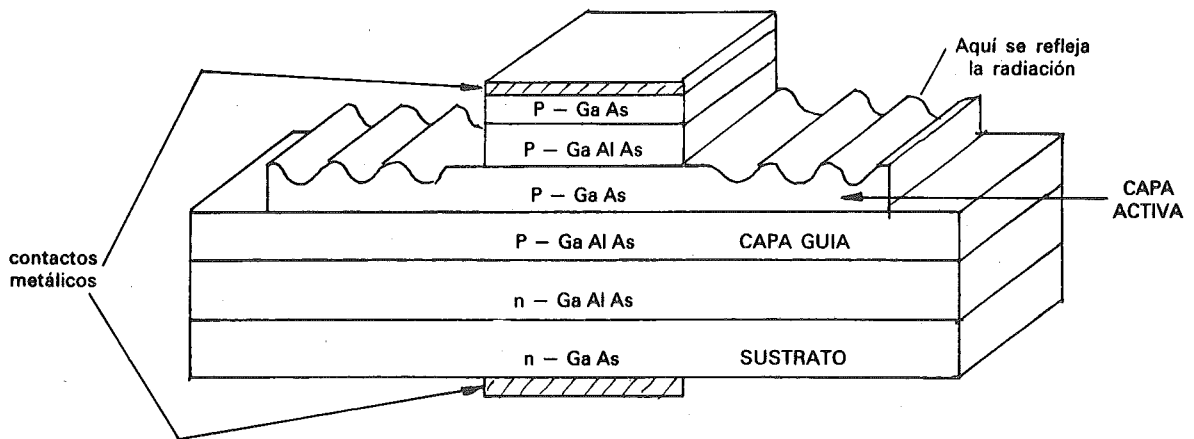
Todos ellos utilizan la dependencia de  $\lambda$  en las reflexiones de Bragg. Unicamente veremos sus características físicas.

1. Con red de difracción externa

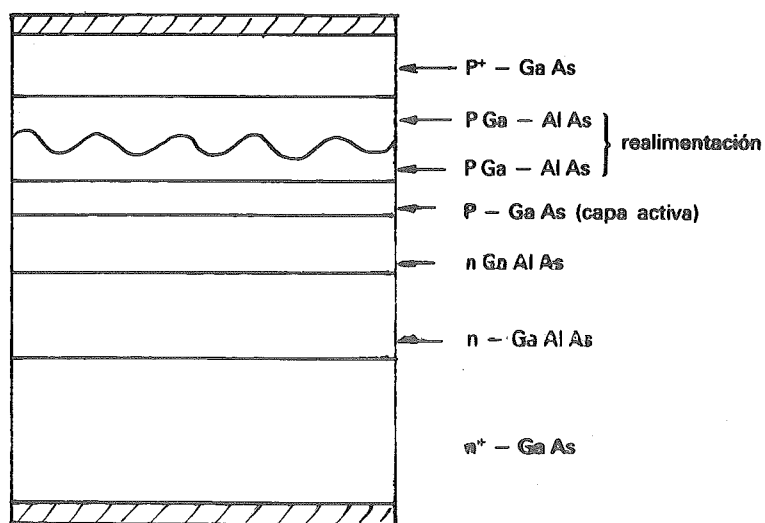


Unicamente habrá realimentación hacia el láser en una longitud de onda.

2. Red de difracción en el sustrato externo a la cavidad láser



3. Red de difracción incorporada en el dispositivo



Láser de realimentación distribuida.

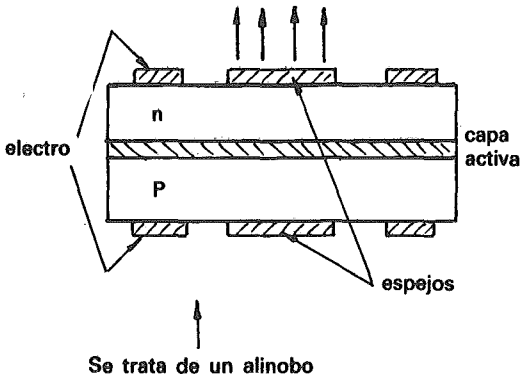


Seguidamente trataremos de ver otro tipo de emisores, los diodos láser. Primeramente veremos algunas de sus posibles geometrías y después algunas de sus características, ventajas y problemas.

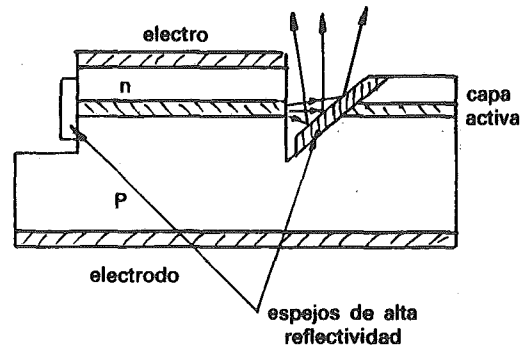
## 1) Diodos láser con emisión en superficie

### 1. Geometrías posibles

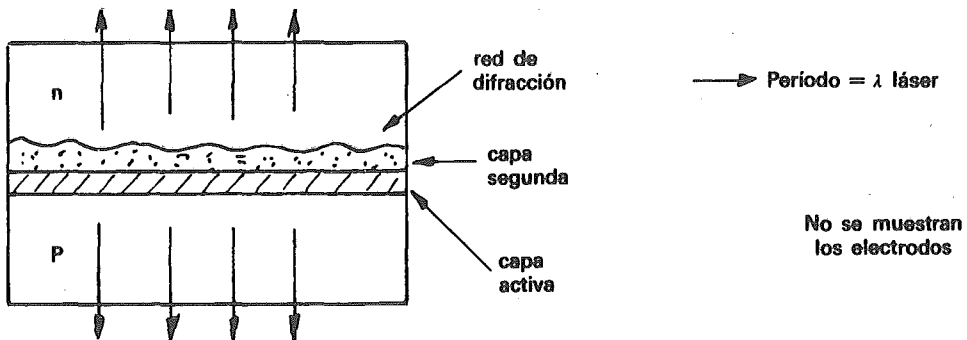
#### a) Dispositivo de cavidad vertical.



#### b) Dispositivo con cavidad horiz. y deflector integrado del haz



c) Sección de salida de un láser de cavidad horizontal, con redes de difracción de salida y de realimentación:



### 2. Características

a) Los espejos son circulares con diámetros que oscilan entre los 5 y los 20  $\mu\text{m}$ . Los electrodos son anulares. Posee una pequeña ganancia por lo que las pérdidas han de reducirse al mínimo.

b) Esta geometría nos propone un diodo láser análogo a un láser de borde. El haz de salida será elíptico y tratará de llevarse directamente a la fibra.

c) Este último es análogo a un láser de realimentación distribuido. Necesita eliminar una de las radiaciones verticales de salida. Ha proporcionado el haz más estrecho reportado. ( $\sim 0,25^\circ$ ).

### 3. Ventajas

1. Permite la producción en serie mediante la realización de arrays 2-D. Es una producción parecida a la que se lleva a cabo en microelectrónica para implementar circuitos

integrados. Con ello podremos obtener a la vez varios diodos láser de características muy semejantes.

2. Las pruebas iniciales pueden realizarse sin separar los dispositivos en chips de la oblea.

3. Se espera un trabajo en modo único longitudinal debido a su gran espaciado de modos.

4. Puede obtenerse un haz de salida casi totalmente circular lo cual supondrá una fácil colimación.

5. Podría permitir la disposición vertical de otros componentes al igual que se hace hoy en las obleas de Si para la fabricación de circuitos integrados. Esta es, sin embargo, una posible ventaja del futuro.

#### 4. Diseño:

La densidad de corriente umbral viene dada por:

$$I_{th} = \frac{e \cdot d \cdot B_{eff}}{A_o^2} \left( \alpha_{ac} + \alpha_{in} - \alpha_{ex} + \frac{L}{d} \alpha_{ex} + \frac{1}{d} \frac{1}{R_F \cdot R_T} \right)^2$$

donde:

$A_o$  = coef. de ganancia

$L$  = longitud de cavidad

$e$  = carga del  $e^-$

$\alpha_{in}$  = pérdidas por absorción residual

$\alpha_{ac}, \alpha_{ex}$  = pérdidas absolutas en capa activa y de cubierta

$B_{eff}$  = cte. de recombinación efectiva.

Ej.: Para  $R = 95 \%$ ,  $d \cong 2-3 \mu m \rightarrow I_{TH} = 25-30 \text{ KA/cm.}^2$

#### 5. Aplicaciones

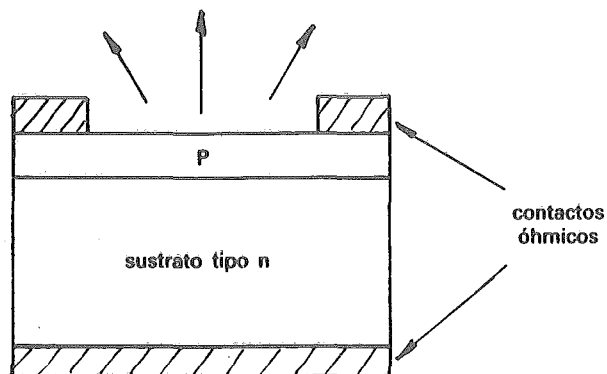
1. Láseres de alta potencia (anays)

2. Optica planar en capas

#### m) Estructuras Led

Son otros posibles dispositivos de emisión muy parecidos a los láseres. Sin embargo, no poseen cavidad ni disponen de realimentación lo cual supone diferencia con los láseres.

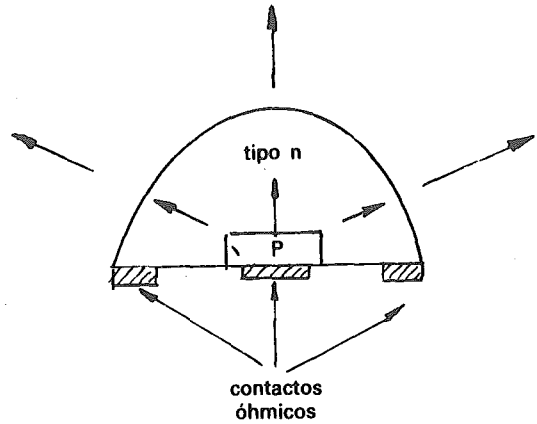
##### 1. Led planar



Saldrá luz por toda la superficie

Baja radiancia

2. *Led de cúpula*

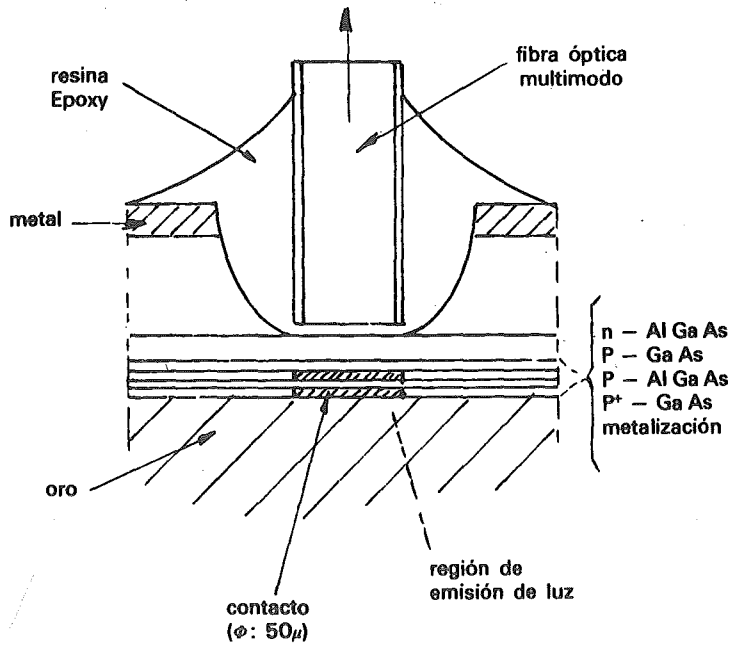


Este tipo de LED posee mayor eficiencia que el planar.

La radiancia se verá reducida debido a que la cúpula es claramente mayor que el área de recombinación.

3. *Led de emisión superficial (tipo humus)*

Tiene una gran facilidad de implementación en sistemas. Reducirá la emisión a una pequeña región interna.



La potencia óptica acoplada a la fibra es:

$$P_c = \pi(1-r)A \cdot R_o \cdot (NA)^2$$

r: coef. de reflexión Fresnel en la superficie de la fibra.

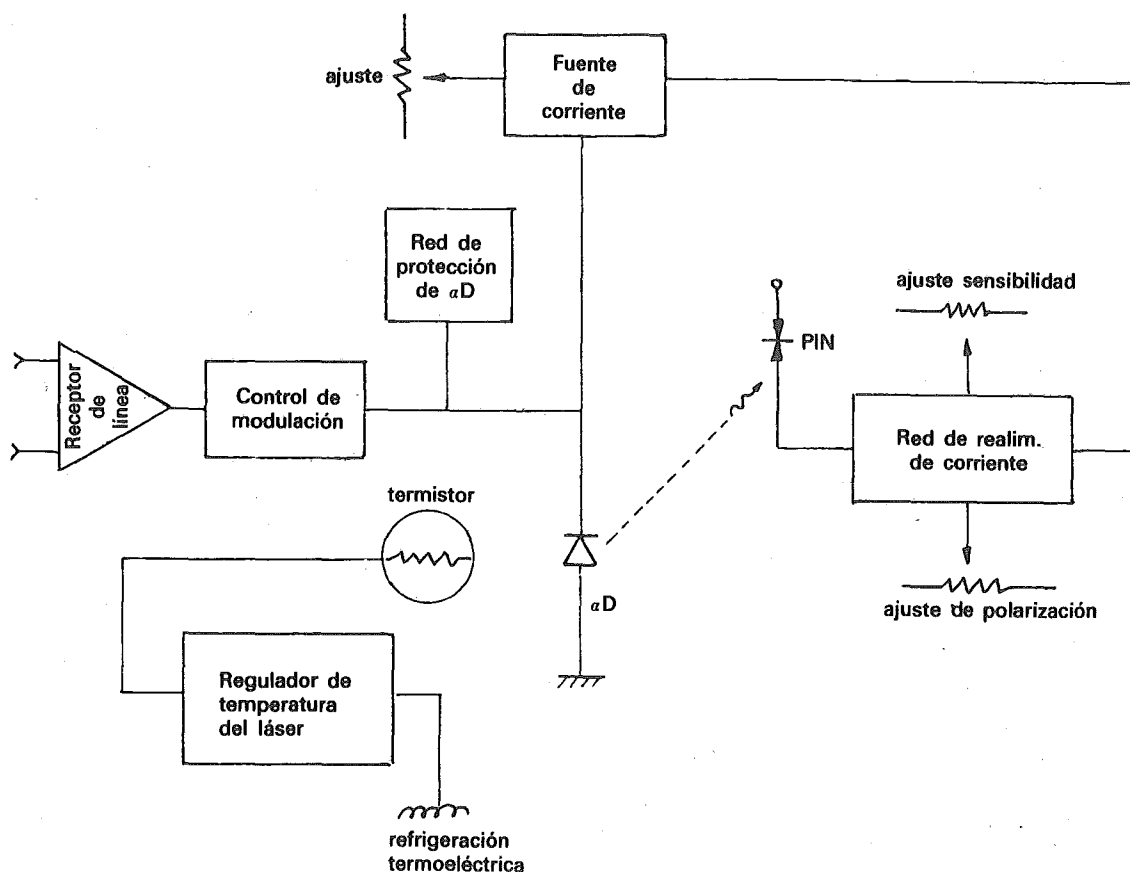
A: el más pequeño de la superficie del núcleo de la fibra o del área de emisión.

R<sub>o</sub>: radiamina de la fuente.

En fibras de índice gradual el diámetro de la fuente ha de ser 1/2 del de la fibra.



## 2. Transmisor con LD (diodo láser)



## 4. ACOPLES ENTRE FIBRAS

### a) Tipos de acoplos

Existen 2 tipos básicamente:

- 1) *Soldaduras*: Uniones permanentes o semipermanentes.
- 2) *Conexiones*: Uniones temporales de fácil instalación.

En ambos tipos de acoplos se producen pérdidas:

\* Reflexión de Fresnel: originada en la interfase entre dos medios de índice de refracción diferente:

$$\tau = \left[ \frac{n_1 - n}{n_1 + n} \right]^2 \text{ es la fracción de la luz reflejada}$$

$n_1$ ,  $n$  son los índices de ambos medios.

Las pérdidas serían:

$$\text{PERDIDAS FRESNEL} = -10 \log_{10} (1 - \tau)$$

Este tipo de pérdidas puede anularse, casi prácticamente en su totalidad mediante el uso de líquidos de ajuste de índice.

\* Desalineamiento de fibras: cualquier desviación de los parámetros geométricos y ópticos de las fibras a unión.

Puede ser:

- Diferentes diámetros de núcleos y/o cubiertas.
- Diferentes aperturas numéricas (NA) y/o índices de refracción.
- Diferentes perfiles.
- Defectos en las fibras.

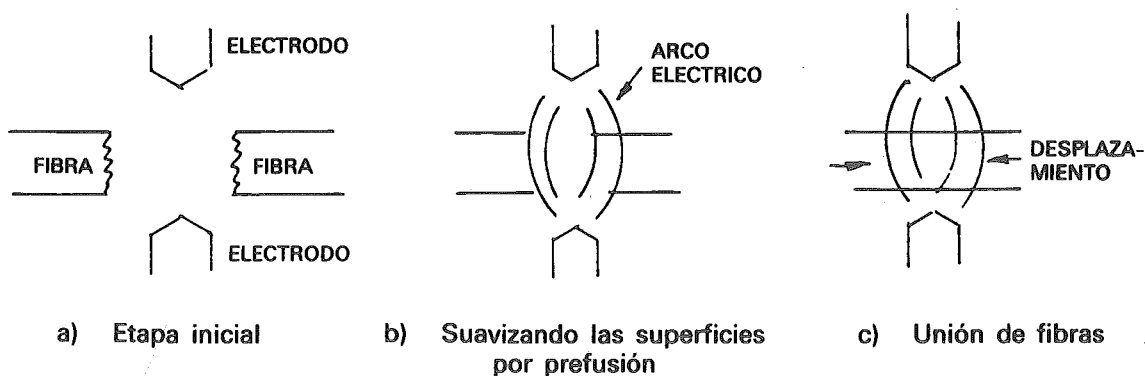
Veamos ahora con más detalle cada tipo de acoplo:

## b) Soldadura de fibras

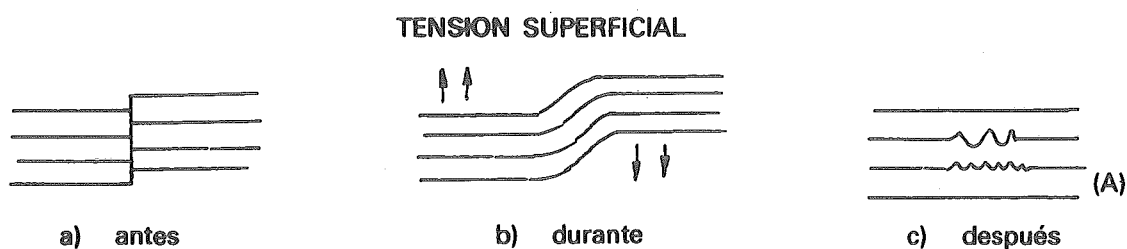
Generalmente sirven para conexiones de gran distancia. Son de 2 tipos: por FUSION y MECANICAS. Las pérdidas se encuentran entre 0,1 y 0,2 dB. Requieren que las fibras estén bien cortadas y pulidas.

### 1) Soldaduras por fusión:

Los extremos de las fibras se unen mediante observación por microscopio y bien con microollama (Argon + Hidrógeno) o con microquemadores ( $O_2$ ,  $H_2$  + vapor alcohol), se las lleva al punto de fusión. El método más utilizado es el arco eléctrico.



Se pueden producir algunos defectos.

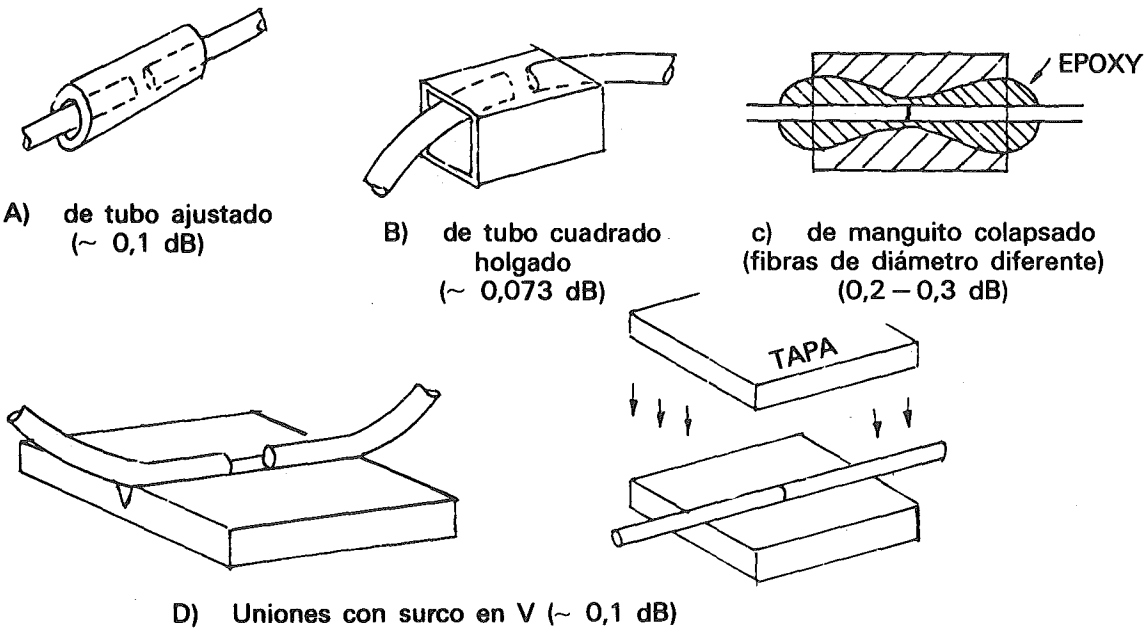


Las fibras que ofrecen mayores dificultades son las fibras monomodo (diámetros de núcleo entre 3 y 10 requieren offsets  $< 1 \mu$ ). Se pueden compensar los errores con autoalineamiento de (A) llegándose a pérdidas de tan sólo 0,18 y 0,12 dB.

Es evidente el decir que las uniones son más frágiles que el resto de la fibra.

2) *Soldaduras mecánicas:*

Se introducen las fibras en tubos y luego se sellan. Veamos los diferentes tipos:

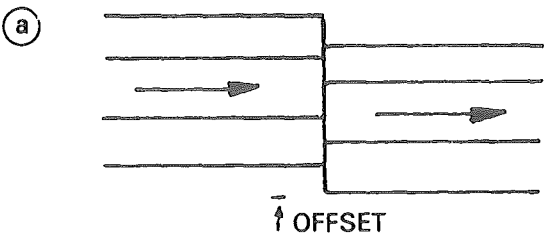


Este último método se ha generalizado a múltiples uniones (12 × 12).

c) **Conectores**

Dispositivos que realizan una unión temporal entre 2 extremos de fibras o entre un extremo de una fibra y un transmisor o un receptor. La atenuación puede producirse por varias causas:

1. *Translape de los núcleos de las fibras:*



Las pérdidas son aproximadamente igual a la fracción de área que no translepa.

Por ejem.; si el offset es 10 % del diámetro del núcleo pérdidas 0,6 dB.

Este tipo de atenuación es muy importante en fibras monomodo.

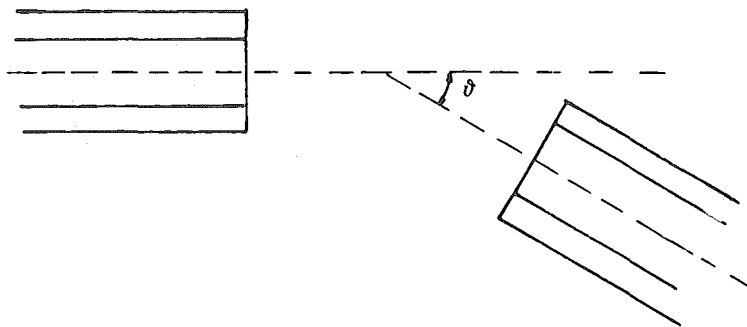
- a) Por diferencias en los diámetros de los núcleos.
- b) Por elipticidades de los núcleos, o excentricidades de los mismos respecto al eje de la fibra.



**Ambos casos muy exagerados**

## 2. Desalineamiento de los ejes de las fibras:

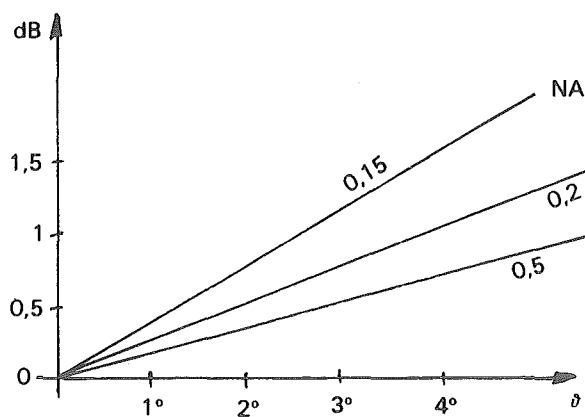
Muy exagerado;



$\vartheta$  = ángulo de desalineamiento.

Seguramente el ángulo  $\vartheta$ , mayor en el número de rayos que se “perderán” al entrar en la otra fibra.

Este problema se aminora aumentando el ángulo de aceptación NA.

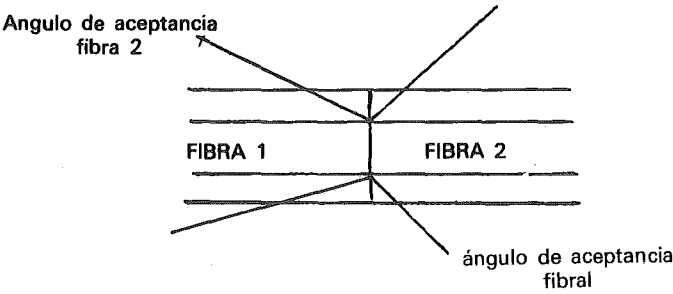




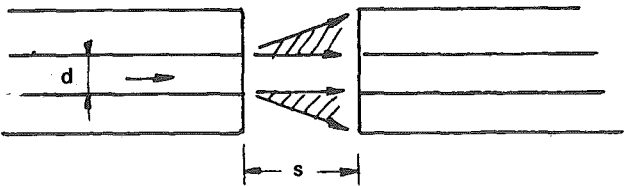
3. *Apertura numérica de la fibra:*

Es la pérdida más importante, se produce en fibras con menor NA que reciben luz de otras de mayor NA, perdiéndose parte en modos no confinados. Las Pérdidas son:

$$\text{PERDIDAS (dB)} = 10 \log \frac{NA_2^2}{NA_1^2} \quad \begin{matrix} 2 \rightarrow \text{recibe} \\ 1 \rightarrow \text{da} \end{matrix}$$



4. *Separación entre fibras:*



Las pérdidas aumentan con NA.

$$\text{PERDIDAS (dB)} = 10 \log \left[ \frac{d/2}{d/2 + Sx \operatorname{tg}(\arcsin (NA/no))} \right]^2$$

siendo no: índice del material entre fibras.

Aun en el caso en que la luz no se “abriera” también habría pérdidas por reflexión de FRESNEL. Con lo cual hay la necesidad de cubiertas de antirreflexión o líquido de ajuste de índice.

5. *Conexión entre fibras monomodo y multimodo:*

Es necesario hacer un estudio cuidadoso de las mismas, si no las pérdidas pueden ser aparatosas.

d) **Conectores de montaje**

Se montan en los cables, no en las fibras desnudas. Los puntos de unión pueden ser:

- La propia fibra (Su cubierta del plástico de cobertura).
- El plástico en el que están embutidas las fibras.
- Los componentes rígidos del cable.
- La cubierta del cable.

## e) Tipos de conectores

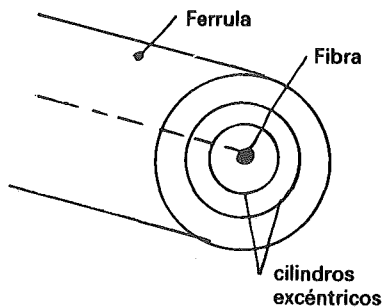
### 1. Conectores de culata articulada:

Casi todos fabricados, para fibras multimodo. Hay de varios tipos:

#### 1.1. Conector de ferrula

También denominado “manguito concéntrico”. Las fibras se unen permanentemente (con epoxy) en unos manguitos (FERRULAS) con un orificio central para situar las fibras. Las 2 ferrulas se colocan en un manguito de almacenamiento y las fibras quedan enfrentadas. Los extremos de las fibras han de estar pulidos y ser perpendiculares a sus caras a los ejes.

#### 1.2. Conector excéntrico

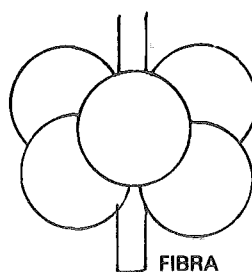


Consta de 2 cilindros excéntricos en el interior de la ferrula. Las 2 partes se hacen coincidir mediante giros de los cilindros. Ha dado 0,48 dB en fibras graduales multimodo, si se utiliza líquido de ajuste de índice solo 0,2 dB.

#### 1.3. Conector de bola triple

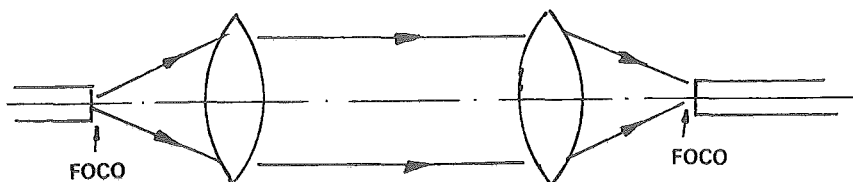
El principio del diseño es dinámico. Barado en las bolas perfectas de TUNGSTENO.

Las pérdidas son de 0,49 dB y 0,18 dB utilizando líquido de ajuste de índice.



### 2. Conectores de haz expandido

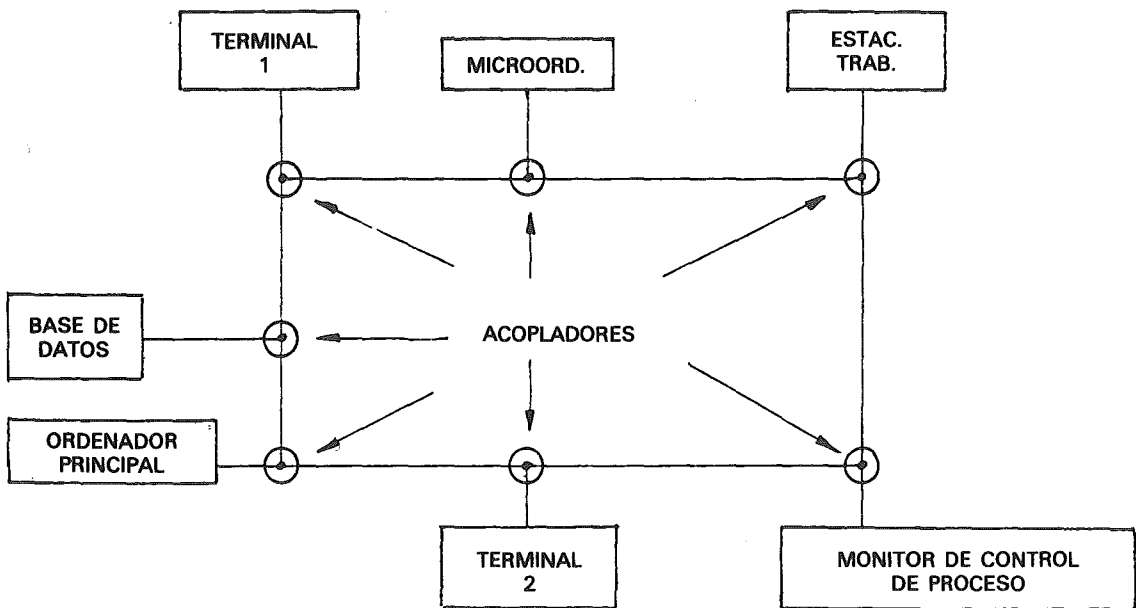
Permiten mayores tolerancias en los ajustes. Consiste en 2 lentes idénticas y de diámetro mucho mayor que el de la fibra, una para calimar la luz y la otra para reenfoclarla en la otra fibra:



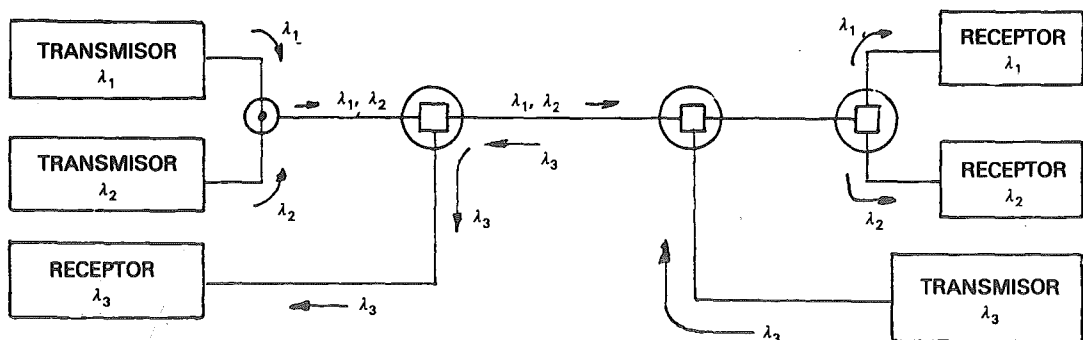
## f) Acopladores

Conectan tres o más fibras, en lugar de sólo 2 como en el caso de los conectores o los empalmes. Son mucho más complejos que los eléctricos. Algunos ejemplos donde son necesarios:

### 1. Redes de área local



### 2. Multiplexado en longitudes de onda



○ □ son acopladores sensibles a la  $\lambda$ . Esto significa que dejan pasar todas las  $\lambda$  menos una que reflejan (se verán más adelante).

## g) Condiciones de Partida para el diseño de acopladores

- Número de puertas ( $n \times m$ ) (entradas  $\times$  salidas).
- Sensibilidad a la dirección en que se transmite la luz.
- Selectividad a las  $\lambda$

- Acoplo activo o pasivo.
- Tipo de fibra (mono o multi).
- Niveles de potencia requeridos.
- Pérdidas toleradas en el acoplador.
- Costo.

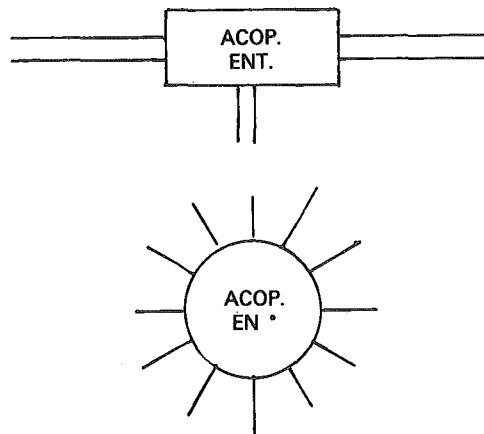
#### h) Acopladores pasivos

El hecho fundamental en el que se basan es:

$$\text{ENTRADA} - \text{PERDIDAS} = \sum_i \text{SALIDA } i$$

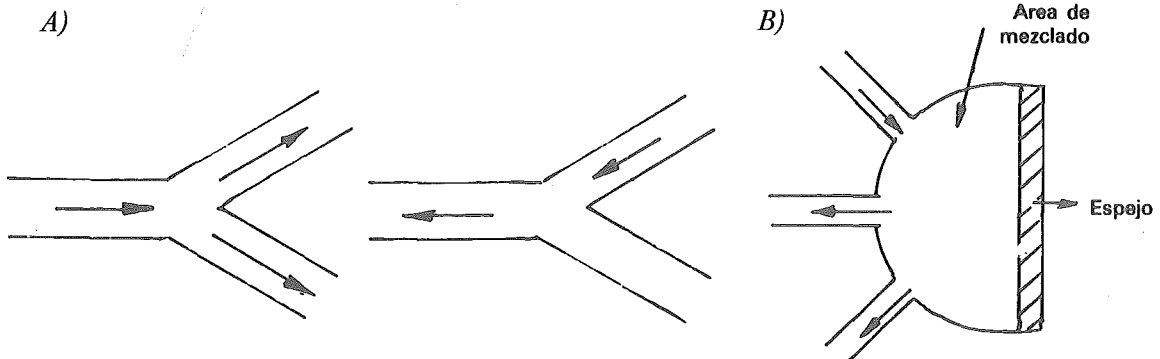
Hay varios tipos;

##### 1. Acopladores ENT y en estrella



La luz se mezcla en un elemento central y sale de él a las fibras.

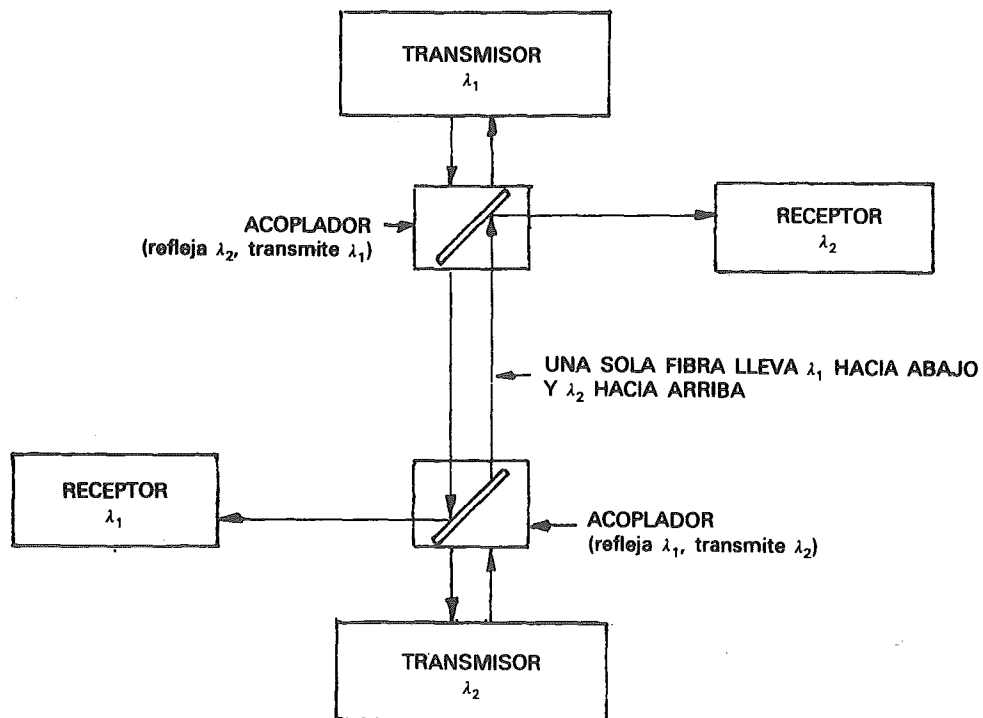
##### 2. Acopladores direccionales



La luz entre por una cualquiera de las entradas y sale por las otras 2. Es bidireccional.

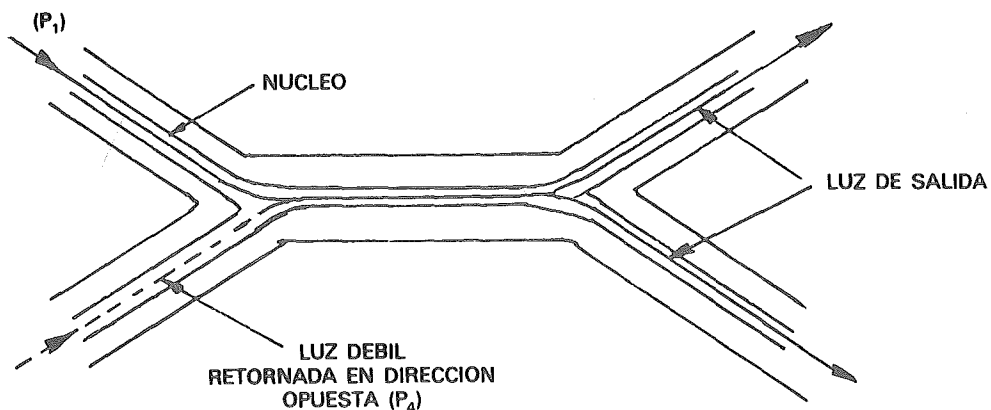
### C) Selectividad de la $\lambda$

Son también acopladores bidireccionales, además con muy bajas pérdidas (0,1 – 10 dB). Usados en W.D.M. Consiste en que el elemento permite el paso de una  $\lambda$  y refleja otra, así por ejemplo podemos transmitir información diferente en 2 longitudes  $\lambda_1$   $\lambda_2$  por una sola fibra;



### i) Acopladores más usuales

#### 1. Acopladores en T ( $2 \times 2$ )



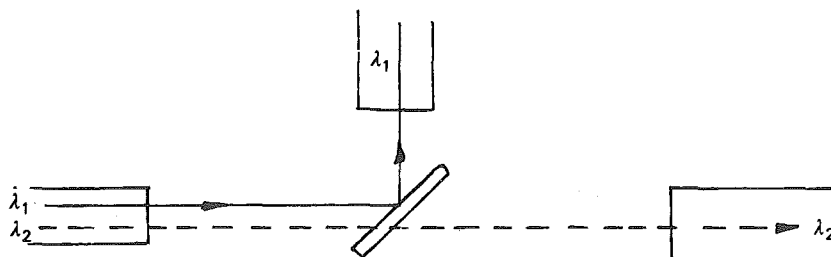
Las fibras se unen mediante fusión → ACOP. DE FIBRA FUNDIDA. En el caso en que los núcleos no se unen el acoplo es por el campo evanescente. Esto está en estrecha

relación con la óptica integrada. Como puede verse son bidireccionales, dividen una luz de entrada en 2 ramas de luz de salida. Sin embargo siempre hay pérdidas de luz retornada  $P_n$ :

$$\text{DIRECTIVIDAD (dB)} = -10 \log \frac{P_n}{P_i} \rightarrow 40.45 \text{ dB}$$

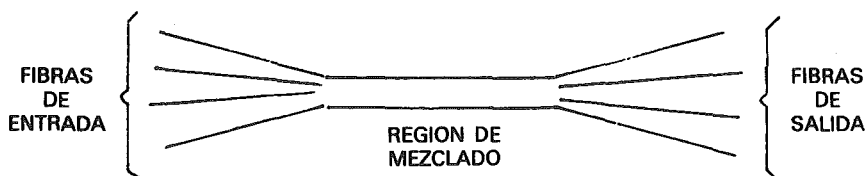
## 2. Divisores de haz

Sirven para acopladores selectivos de  $\lambda$ . Se fundamentan en un espejo multicapa que refleja una  $\lambda$  y transmite otra.



## 3. Acopladores en estrella

Es una generalización del primer caso para un número de ramas de entrada y salida mayor que 2.

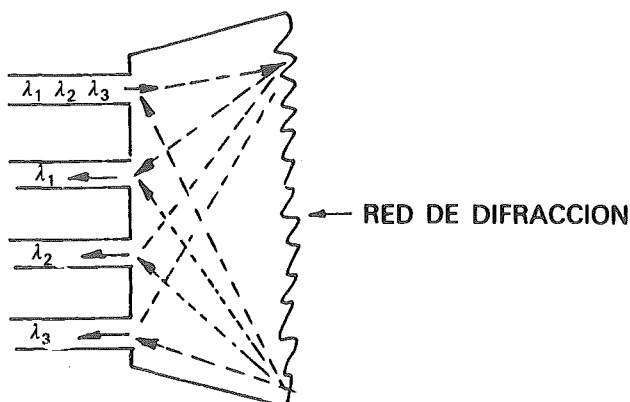


Los núcleos de las fibras se funden en una región de mezclado. Comercialmente existen acopladores  $64 \times 64$ .

Otra variante son los de *reflexión* que se consiguen cortando la región fundida y cubriéndola con un espejo. Las pérdidas en este caso son 3 dB aproximadamente, más que en los de *transmisión*.

## 4. Acopladores multipuerta selectivos en $\lambda$

Una de las posibilidades ya se ha indicado con los acopladores en estrella de reflexión. Otra consiste en utilizar una red de difracción que separe según los diferentes ángulos de salida las diferentes  $\lambda$ . Puede combinar las  $\lambda$  de entrada en una única salida o al revés:



## j) Cables

En principio el cableado es similar a los convencionales. La diferencia fundamental está en que al no ser las fibras conductoras no es necesario un aislamiento eléctrico entre ellas. Comparativamente son más pequeños que los de cobre y sobre todo no resisten tensiones como éste (si se estira más de un 5 % se rompen). Además la fibra óptica es elástica (hasta la rotura) mientras que el cobre es inelástico.

### 1. Razones para el cableado

Fundamentalmente son:

- Facilidad de manejo: Las fibras son muy finas, transparentes. El cableado permite poner varias juntas y poner mejor los conectores.

- Protección: En la instalación y uso, debido a la fragilidad de las fibras.

- Resistencia al aplastamiento: El cable permite a la fibra soportar presiones que por sí sola no soportaría. Depende de su situación: oficinas, suelo, sumergidas.

- Persistencia a la degradación: Protege a la fibra de la humedad, el calor y de contaminantes peligrosos que podrían hacer variar sus propiedades ópticas.

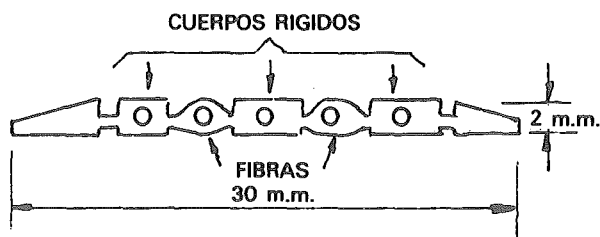
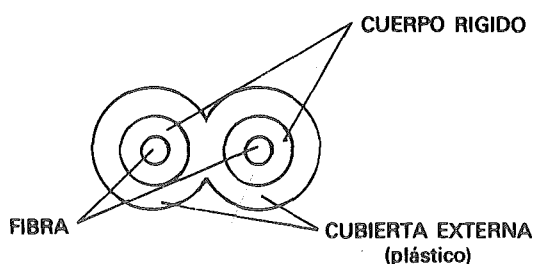
Una pega importante sin embargo es que el precio de la fibra crece considerablemente al introducir el cableado.

### 2. Tipos de cables

Generalmente dependen de los entornos de utilización:

- *Para equipos*: pequeños, sencillos y baratos (protegidos por el equipo).

- *Para oficinas*: suelen ser una o 2 fibras similares a los cables normales o planos. Son de bajo costo, pequeños, duraderos y de fácil instalación. Compatibles con los conectores existentes;



- *Para edificios*: Similares a los de oficina pero con más fibras.

- *Para muros*: Contienen subcables para irse dividiendo según los terminales.

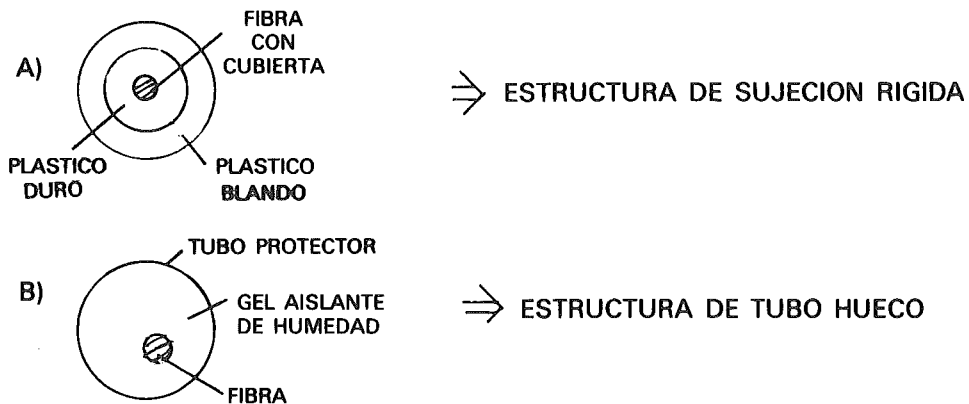
- *Fijos*: No inflamables. Relativamente caros.

- *Temporales*: Portátiles, baratos, tienen una sola fibra, duraderos para ser usados varias veces. Similares a los de oficina.

- *Militares*: Para ser usados en condiciones extremas.
- *Aéreos*: De muchas fibras. Suelen colgarse entre postes. Están recubiertos de polietileno para aguantar temperaturas extremas e internamente para repeler a la humedad.
- *Enterrados*: Como los anteriores, pero además preparados para soportar roeduras.
- *Submarinos*: Llegan a tener hasta 3 capas, una interna con 12 fibras, otra media para las altas presiones y una externa (doble) de armadura.

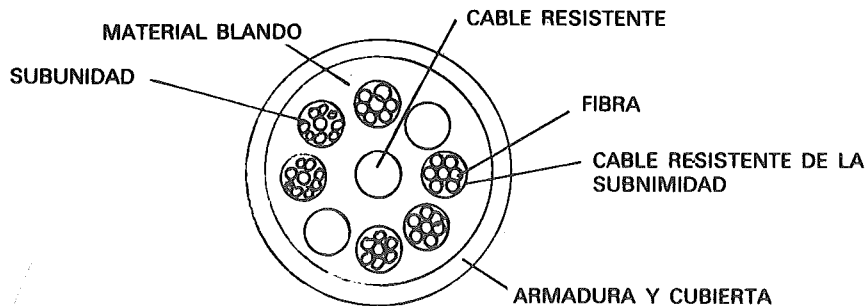
### 3. Partes básicas de un cable

#### 3.1. Soporte



#### 3.2. Distribución de fibras en el cable

Los más sencillos, de 1 fibra, son circulares con la fibra en el centro. Los DUPLEX, pueden ser circulares, elipsoidales o planos. LLevan 2 fibras, son como los de oficina dichos anteriormente. Los de seis se disponen alrededor de un cable resistente, no muy tensos.



#### 3.3. Otros elementos estructurales

Los elementos resistentes son de acero o keular y están en el centro. Exteriormente se reciben por una o más cubiertas de PVC o poliuretano (en los normales) o de polietileno (en los de campo).

#### 3.4. Auxiliares

Algunas aplicaciones como en el caso de las submarinas, incluyen en el interior un cable eléctrico para la alimentación de repetidores. Otras incluyen presión por aire seco para que no entren líquidos. Sin embargo en este último caso hay dudas de su utilización.

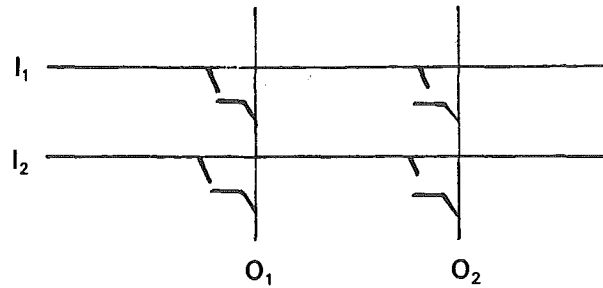


## k) Dispositivos para conmutación fotónica

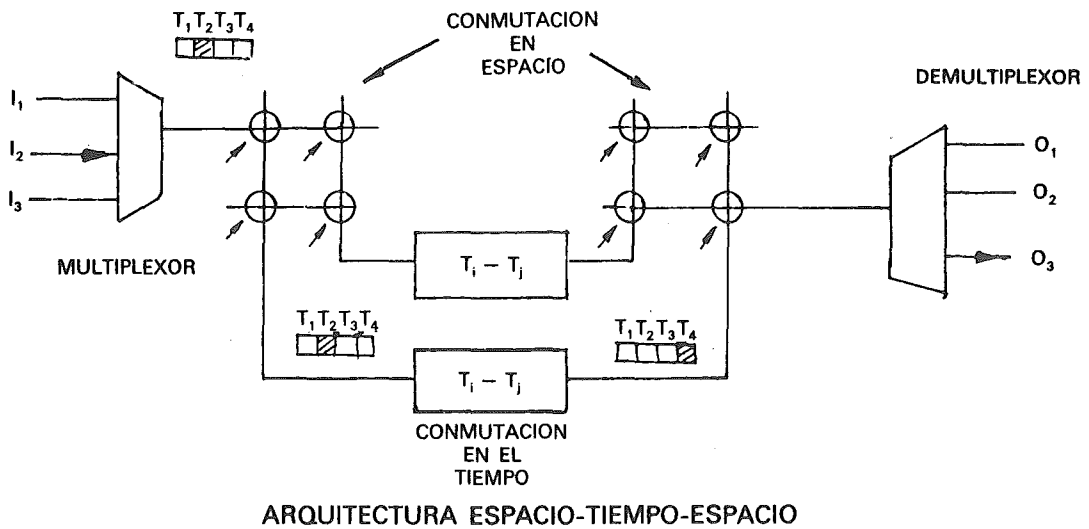
Este es un tema fundamental en el objetivo de crear un sistema integramente óptico. Podemos clasificar los dispositivos según diversos factores:

### 1. Función: (esquema básica)

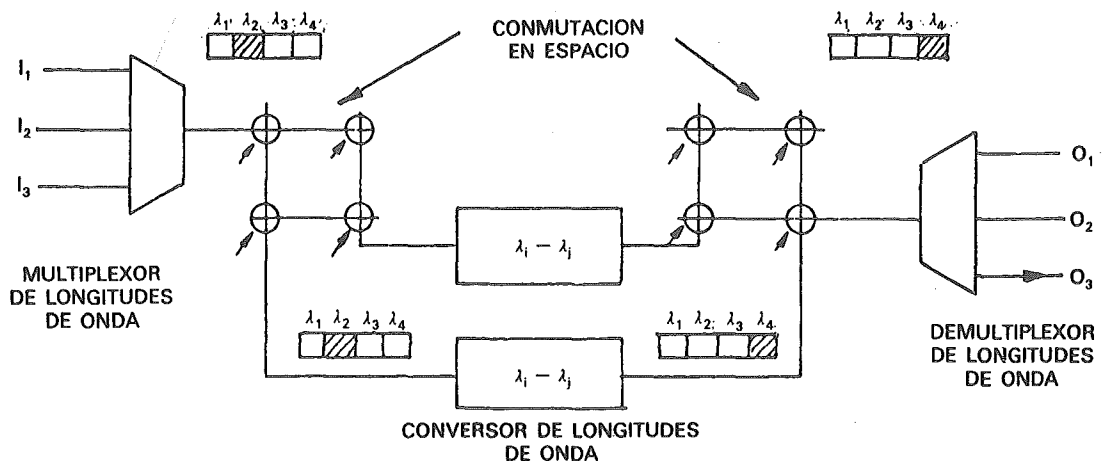
#### 1.1. Conmutación por división de espacio



#### 1.2. Conmutación por división en tiempo



#### 1.3. Conmutación por división en frecuencia



## 2. *Materiales*

Por un lado  $\text{NbO}_3\text{Li}$  y otros ferroeléctricos, por otro semiconductores y por último los materiales orgánicos, también útiles en el futuro quizás para electroóptica molecular.

## 3. *Mecanismo físico para conmutar*

Son fundamentalmente:

- Efecto pochels: Variación lineal de  $n$  con el campo eléctrico.
- Portadores libres.
- Cambios en el espectro óptico de ganancia/absorción.
- No linealidades ópticas de tercer orden.

## 4. *Fundación de control*

Son 2 principalmente los tipos de control:

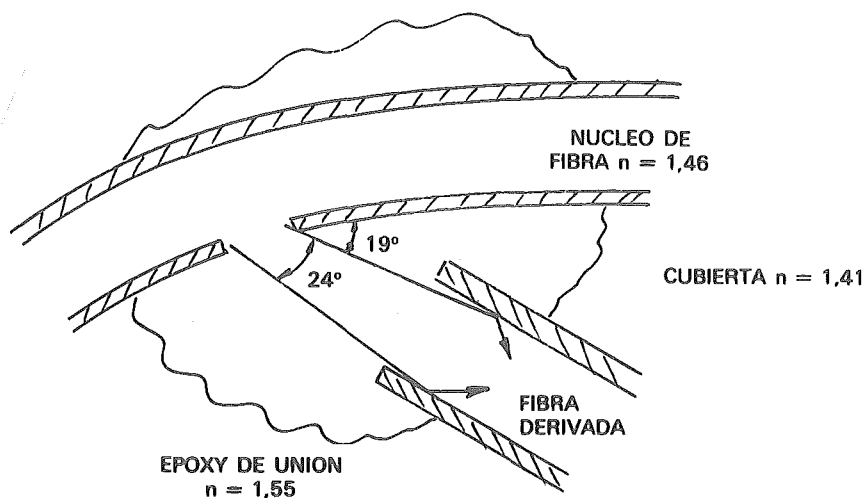
- Eléctricos: Es la más factible.
- Óptica: Es la que más interesa para conseguir un sistema óptico completo.

### 1) **Derivaciones en fibras**

Se utiliza para extraer radiación óptica de una fibra principal o fibra de “BUS” hacia otras secundarias con los siguientes condicionantes; (no verificados en acopladores).

- Nivel de la señal 5 menor que la del BUS.
- Bajar pérdidas.
- Realizable en instalaciones en uso.

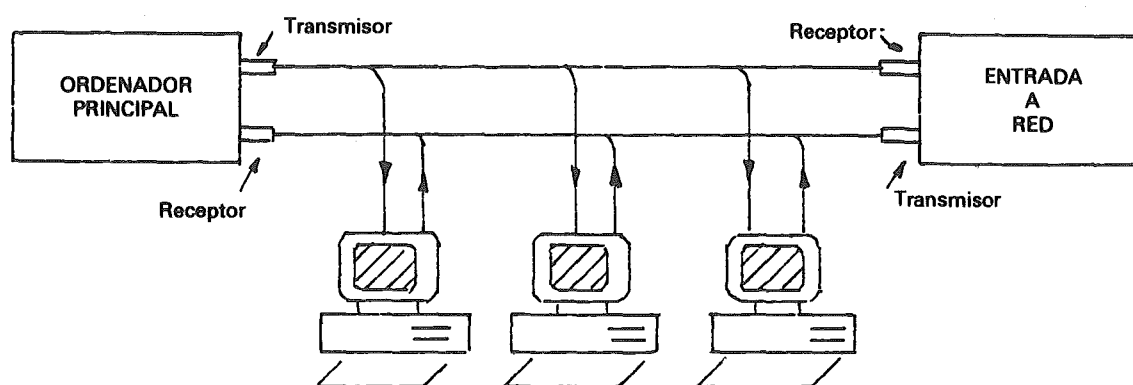
Los más recientes son los basados en fibras de silicio de cubierta dura (HCS). La estructura es:



Los hechos característicos son:

- 1) Uso de una fibra de salto de índice NA medio
- 2) El hueco determina la máxima cantidad de señal que abandona la fibra.
- 3) El epoxy, de alto  $n$ , entre el BUS y la fibra derivada colapsa un ángulo total de  $43^\circ$  en el BUS a uno de  $5^\circ$  en la derivada.
- 4) Es bidireccional.

Este tipo de derivación puede utilizarse en sistemas como el de una red de unión de 64 terminales a un ordenador:



#### m) Algunas ideas de óptica integrada

Algunas ventajas que proporciona la óptica integrada frente a la utilización de componentes discretos:

- 1) Mayor reproductividad gracias a la estructura plana, que permite una posibilidad de abaratamiento gracias a la producción masiva.
- 2) Nuevas aplicaciones no posibles con componentes aislados, debido a que el control es más sencillo a distancias más pequeñas.
- 3) Mejora en la estabilidad. Menores interferencias ante vibraciones y movimientos, de la estructura del soporte.
- 4) Mayor fiabilidad de trabajo por el reducido tamaño.
- 5) Configuramiento de luz por el uso de guía-ondas.
- 6) Mayor eficiencia en la disipación de calor.

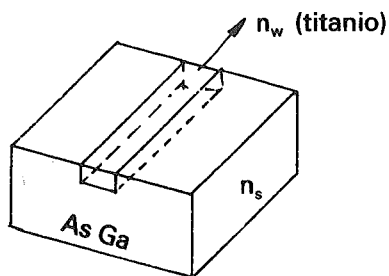
También existen problemas al utilizar distancias tan cortas, como el de enfocar un láser a una guía-onda.

## n) Óptica integrada planar

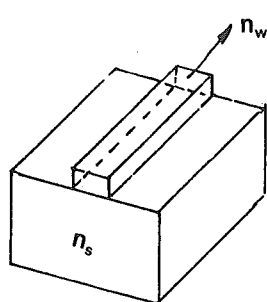
### 1. Estructura de guías de onda

Es el equivalente a una fibra óptica en óptica integrada.

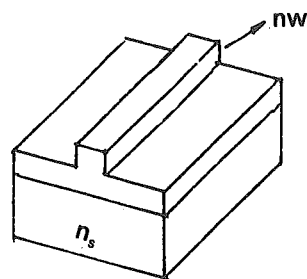
Hay varias posibilidades:



a) GUIA-ONDA

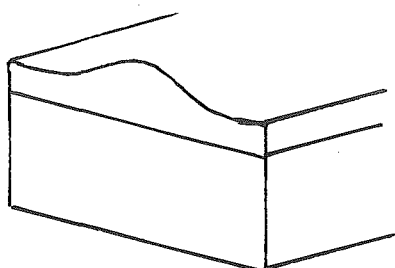


b) GUIA-ONDA en cresta

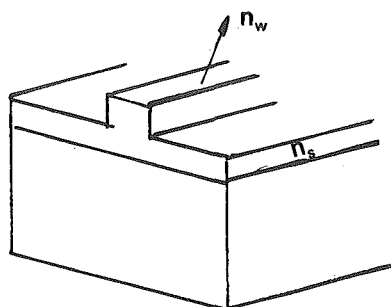


c) GUIA-ONDA en T o acostillada

$$n_s < n_w$$



d) GUIA-ONDA Abombada



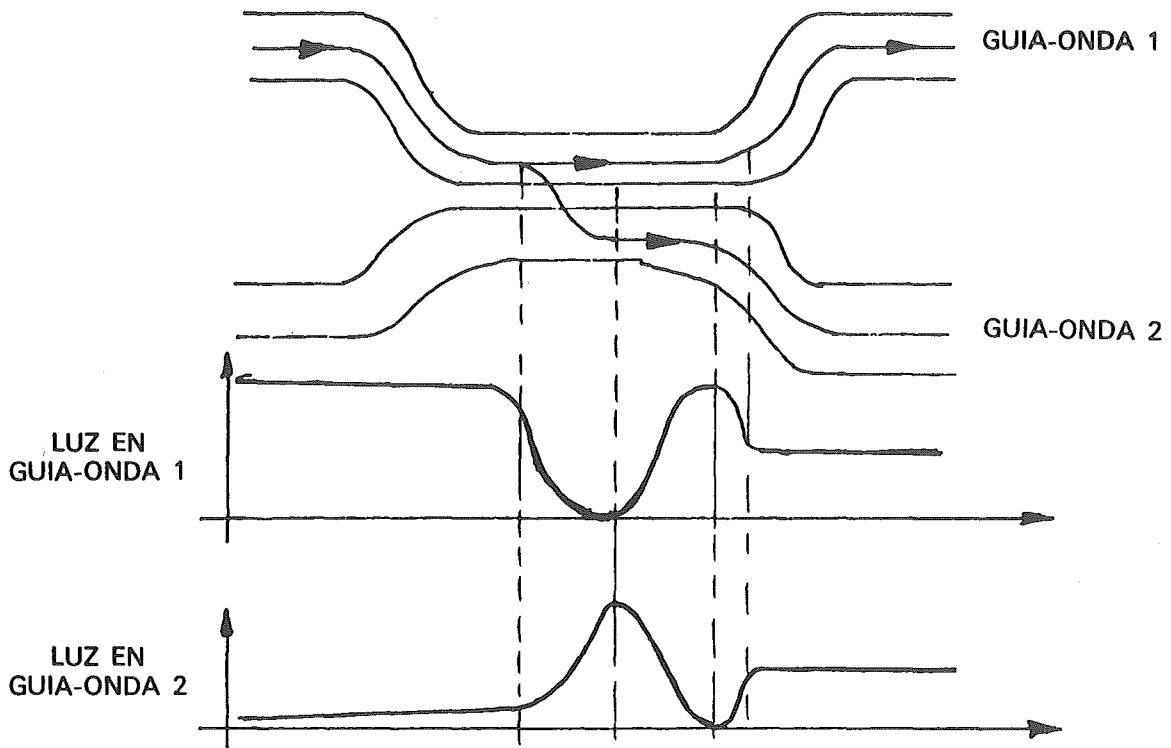
e) GUIA-ONDA de tira cargada

La más utilizada es la a). El método de fabricación primario consiste en la difusión de titanio (Ti) en sustratos de Niobato de litio ( $\text{NbO}_3\text{Li}$ ).

### 2. Acopladores

Se basan fundamentalmente en *el campo evanescente* que aparece cuando una radiación óptica se propaga por una guía de onda por el efecto de la reflexión total, que como se sabe decrece exponencialmente con la distancia a la guía.

Si situamos 2 guías una próxima a otra como en la figura, se produce una transferencia periódica de energía luminosa de una guía a otra, debido al campo evanescente. Variando la longitud de proximidad, es decir la longitud de fibra o guía acoplada podremos conseguir el paro completo o parcial de luz de una guía a otra (conmutación).



En general los factores de los que depende el proceso son:

- La longitud de onda de la luz.
- La longitud de tramo de acoplo entre guías.
- Los índices de refracción de las guías.

La posibilidad de variar el índice de refracción nos daría libertad de conseguir una conmutación en un caso y no en otro. Existen materiales como el  $\text{NbO}_3$ , Li y Asba cuyo índice de refracción varía en función del campo eléctrico aplicado (efecto POCHELS si la variación es lineal).

### 3. Moduladores de fase (integrados)

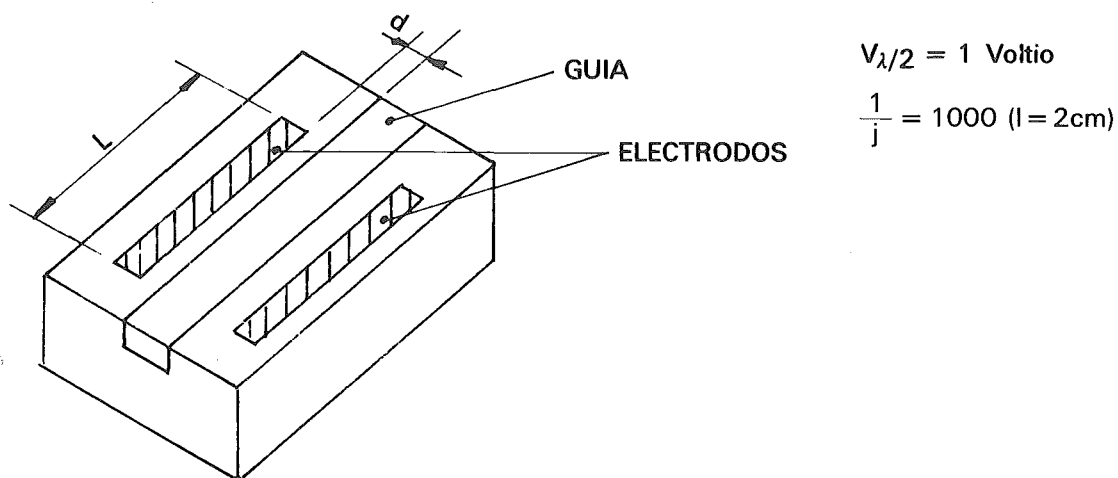
Los moduladores son elementos que modifican una propiedad detectable de la luz, en respuesta a una señal eléctrica. En este caso dicha propiedad es la fase.

Fundamentalmente se basan en fenómenos electroópticos como son el efecto pochels (variación lineal de  $n$  con  $E$ ) y el efecto KERR (variación lineal con  $E^2$ ), anteriormente mencionados. El hecho físico es que además de la variación de  $n$  se produce un cambio de fase  $\phi$ .

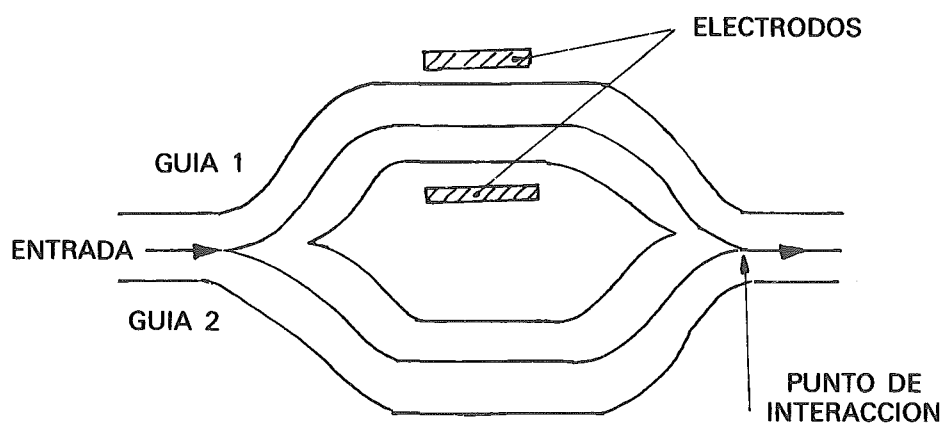
Al voltaje aplicado para conseguir un desfase  $\phi = \pi$  se le denomina voltaje de media onda ( $V_{\lambda/2}$ ).

A continuación veremos algunos tipos de moduladores y de sus aplicaciones.

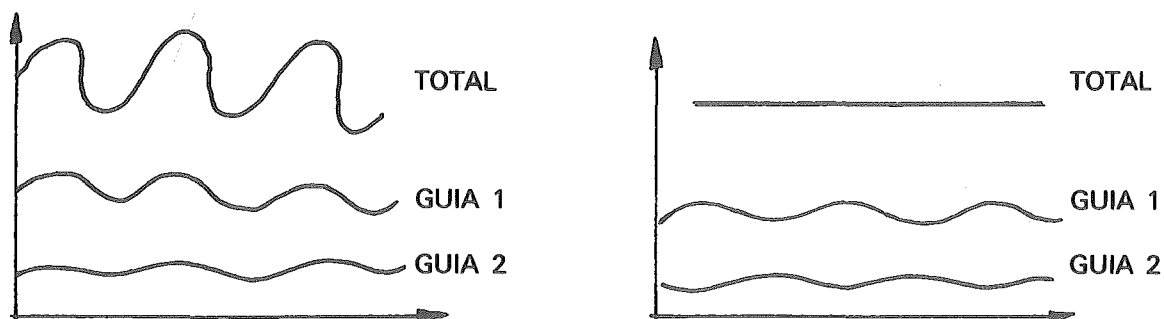
### 3.1. Modulador de fase de tira única



### 3.2. Modulador tipo MACH-ZEHNDER



Debido a la simetría de caminos la luz de entrada se reparte por igual en las GUIAS 1 y 2. Si introducimos un desfase de  $\pi$  aplicando el voltaje de media onda a los electrodos, conseguiremos que en el punto de interacción la luz resultante sea nula:



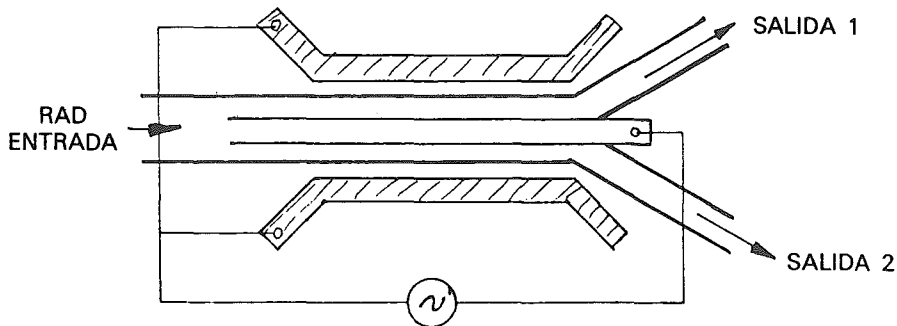
Se han obtenido anchos de banda superiores a 1.1 GHz para un interferómetro de 6 mm y un voltaje de 3,8 v para una separación de guías (GAP) de 0,9 mm.

#### 4. Conmutadores integrados

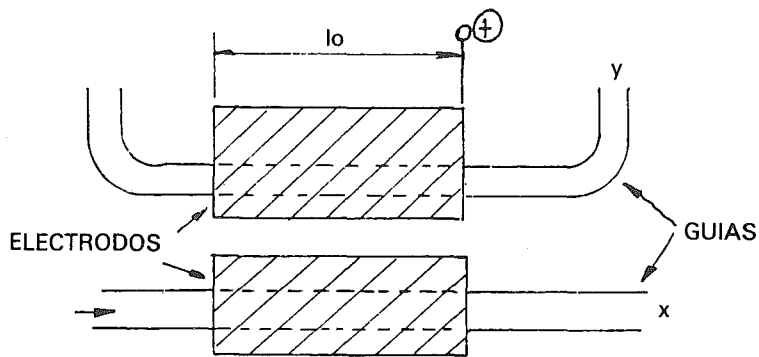
La idea la vimos anteriormente con los acopladores.

Los tipos más usuales son:

##### 4.1. Conmutador en Y electroóptico



##### 4.2. Conmutador en configuración cobra

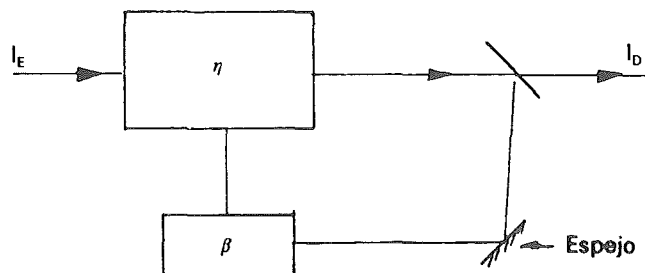


El valor de 10 es muy crítico

#### 5. BIESTABILIDAD OPTICA

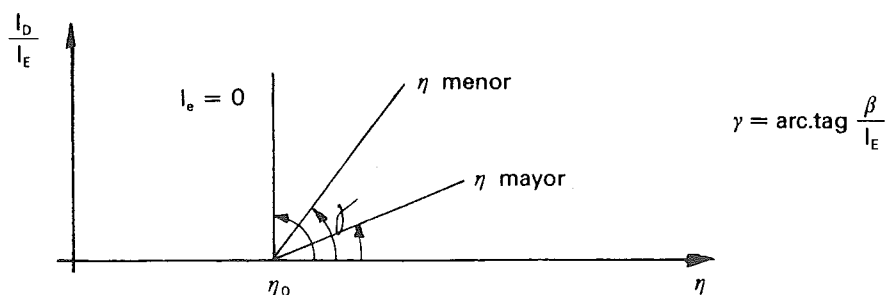
El concepto de biestabilidad como se sabe no es nuevo, lo nuevo ha sido su incorporación a la OPTICA: De alguna forma su desarrollo permitirá la creación de sistemas ópticos con elementos de memoria óptica, etc...

El concepto se entiende fácilmente con el siguiente diagrama:



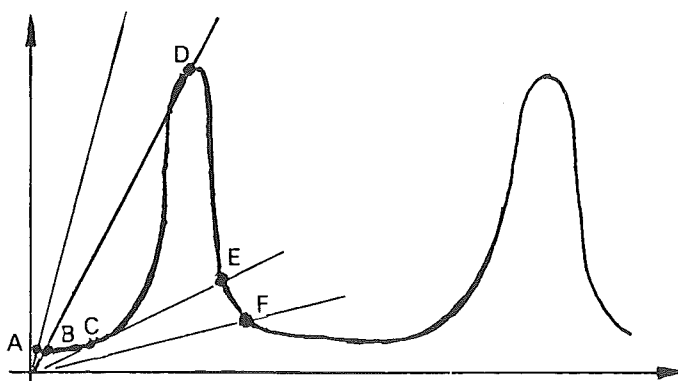
Una radiación luminosa pasa por un material cuyo índice de refracción varía en función de la intensidad que la atraviesa. Por un mecanismo de realimentación parte de la intensidad de salida incide sobre el material, produciéndose un fenómeno de adición entre entrada y salida. Matemáticamente podemos obtener una ley que expone esto:

$$\eta = \eta_0 + \beta I_E - \frac{I_D}{I_E}$$

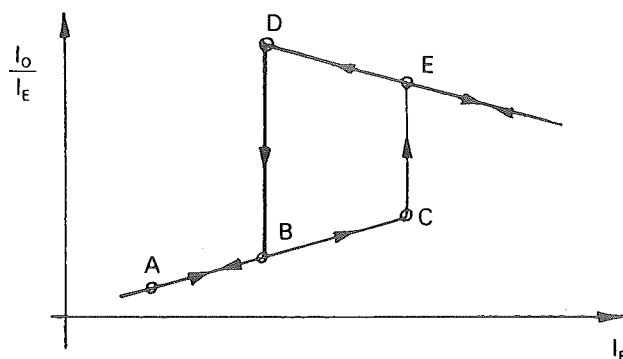


Es decir: para  $I_E$  grandes  $\gamma \rightarrow 0$   
para  $I_E$  pequeñas  $\gamma \rightarrow \pi/2$

Superponiendo este concepto al del resonador de FABRI-PEROT en una gráfica:

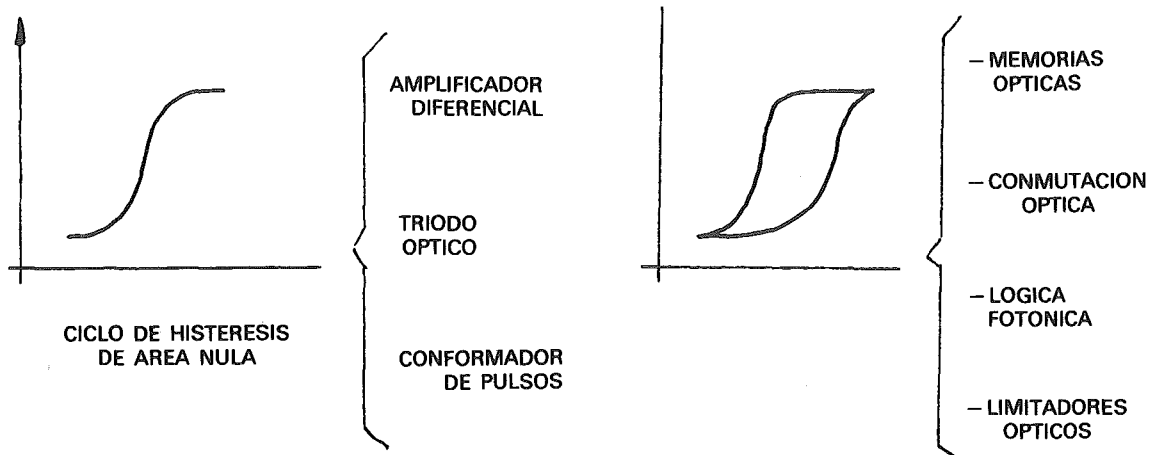


Dependiendo de las diferentes intensidades de entrada, la recta de trabajo tendrá pendientes diferentes que a su vez producirán cortes con la curva del resonador de FABRI-PEROT en diferentes puntos de trabajo; A, B, C, D, E, F. Según vemos, estos diferentes puntos describen un ciclo de HISTERESIS que es el concepto básico del tema de la biestabilidad:





Los modos de trabajo dependerán de la forma del ciclo de histeresis. Este depende del tipo de realimentación del material, etc... Así, por ejemplo:



#### a) Materiales aptos para biestabilidad óptica

##### 1) Características

- No linealidades ópticas muy fuertes.
- Tiempos de respuesta muy cortos.
- Calidad óptica muy buena. Que no se degraden con el tiempo.
- Compatibilidad con la electrónica en uso.

##### 2) Hasta la fecha

- Vapor de Na. Fue el primero en usarse. Hoy en día está en desuso.
- $\text{NbO}_3\text{Li}$  (HIBRIDOS) (mezcla de componentes ópticos y eléctricos).
- Cerámicas.
- $\text{CS}_2$ .
- Cristal líquido cromático.
- Semiconductores (Asba, SbIn).

Han servido más que nada para el hecho de la biestabilidad como fenómeno.

##### 3) Recientes y con perspectiva de futuro

MQW (MULTIPLE QUANTUM WELL) aplicación a la comunicación.

#### b) Tipos de dispositivos biestables ópticos

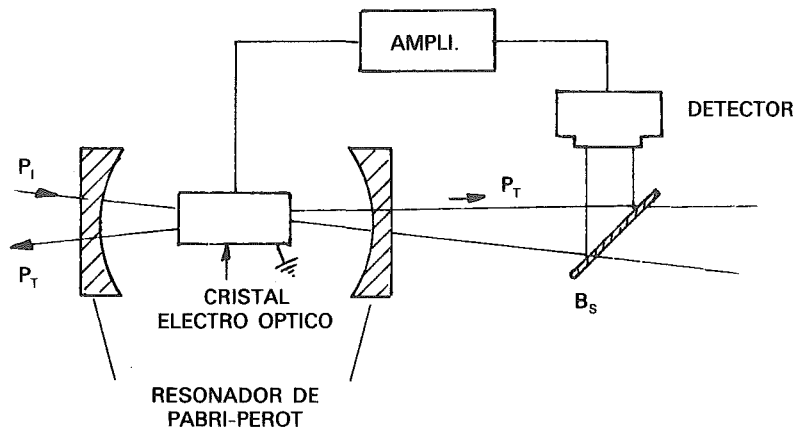
##### 1) D.B.O. Basados en resonadores de FABRI-PEROT

Son de 2 tipos:

- Intrínsecos: La biestabilidad respondía a una variación de  $n$  por la intensidad de radiación luminosa.

— Híbridos: La variación de  $n$  viene ayudada por la aplicación de un campo eléctrico en la realimentación.

Un ejemplo lo vemos:



Es conceptualmente igual al desarrollado en el ejemplo introductorio.

## 2) D.B.O. No resonantes

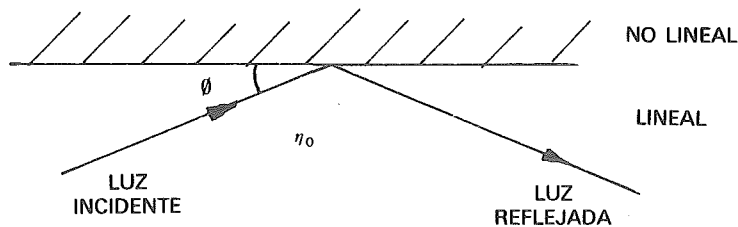
Elimina la reeluminación por espejos. También 2 posibilidades:

- Intrínsecos.
- Híbridos.

## 3) D.B.O. Basados en interfases no lineales

Tenemos 2 medios uno lineal y otro no lineal;

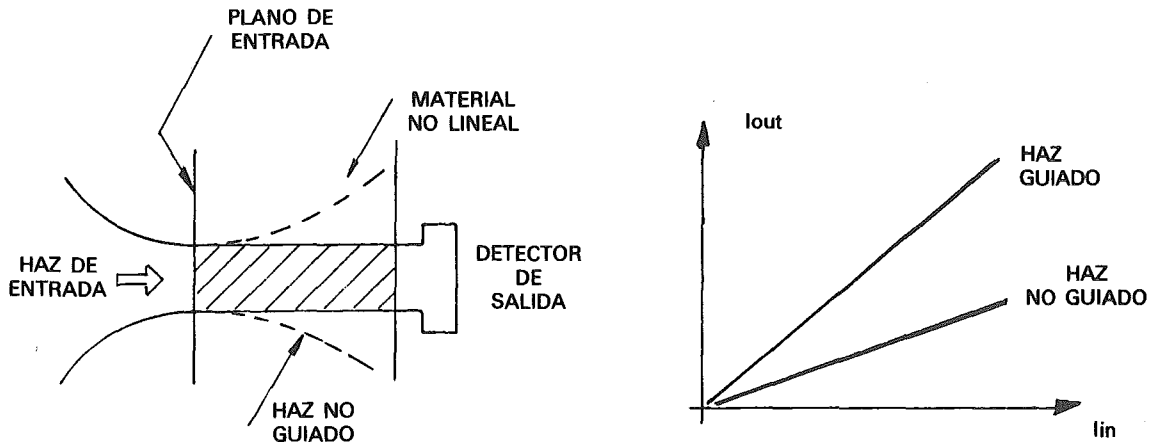
$$\eta = \eta_0 - \Delta + \eta_2 I(x, y, z)$$



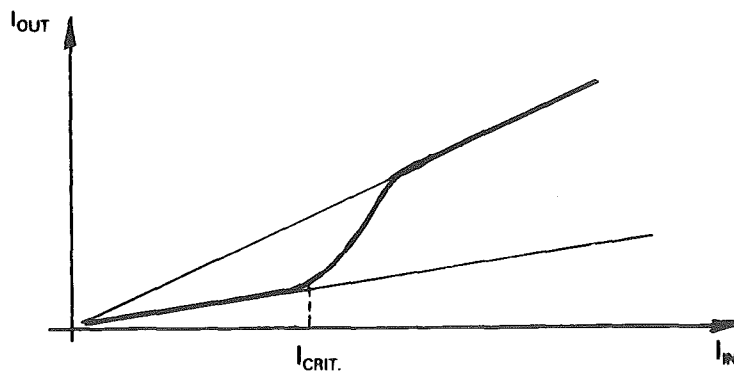
$\phi$  es el ángulo crítico para la reflexión total.

Si la luz aumenta en intensidad, aumenta el campo evanescente en el medio no lineal, cosa que hace variar  $n$  por encima de  $n_0$ , haciendo que el fenómeno de reflexión total se encuentra en uso de transmisión de un medio a otro. Esto supondría un cambio de estado, es decir BIESTABILIDAD. Vemos que no existe ningún tipo de realimentación, con lo cual se consiguen velocidades mucho mayores en la conmutación.

4) *D.B.O. Basados en guía-ondas*



El fenómeno consiste en que para una intensidad pequeña de entrada, pasado el plano de entrada, la radiación se desenfoque, detectándose una intensidad menor. Sin embargo, para una determinada intensidad crítica de la radiación se produce una especie de autoenfoque que provoca un aumento considerable de la intensidad detectada a la salida. Así podemos ver los 2 estados:



5) *D.B.O. Basados en efectos autoelectroópticos*

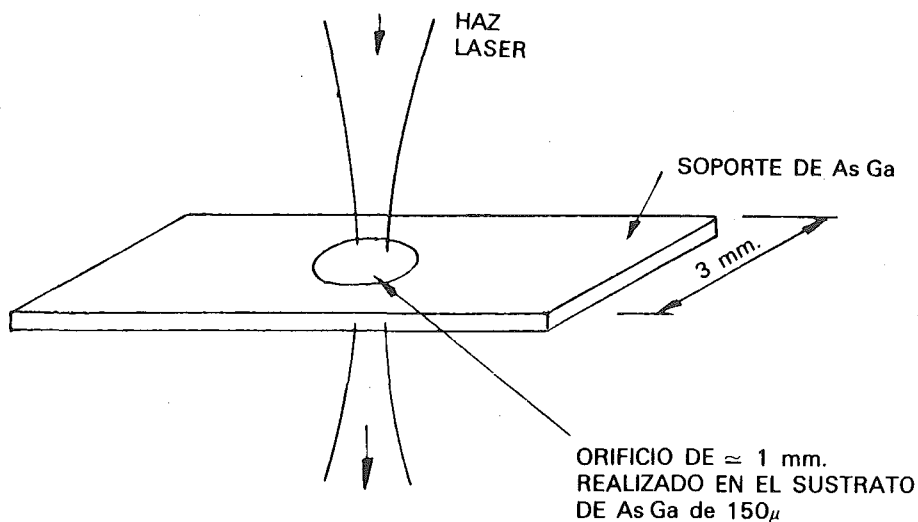
6) *D.B.O. Basados en distribuciones bidimensionales*

Estos 2 últimos más complejos. No nos meteremos en un estudio.

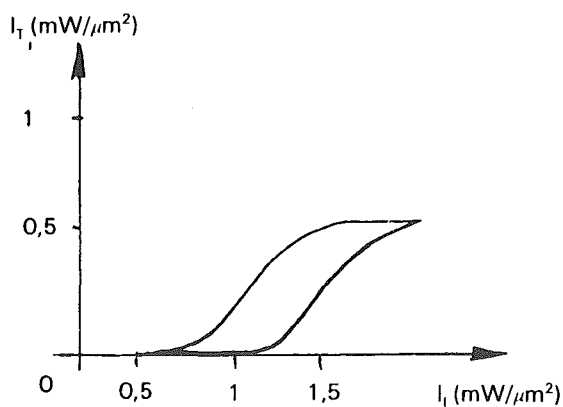
c) **Biestabilidad óptica en semiconductores**

El semiconductor es un elemento activo, no como el caso del niobato. En este sentido por aquí podemos ver el futuro de las comunicaciones ópticas. El mecanismo origen de la biestabilidad consiste en variaciones del índice de refracción ante variaciones de la intensidad óptica.

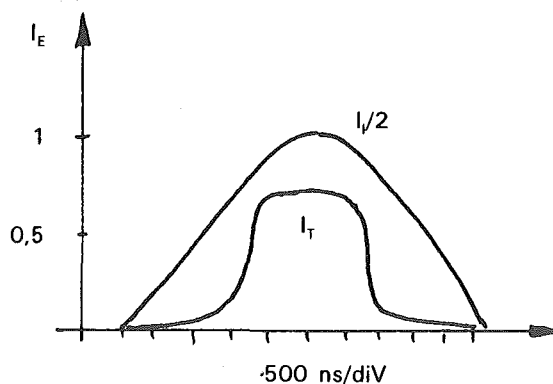
Esto es debido a la resonancia de excitores libres en el AsGa. Básicamente:



La variación de  $n$  no es lineal, ni sencilla. Los resultados experimentales muestran lo siguiente:



Ciclo de Histéresis

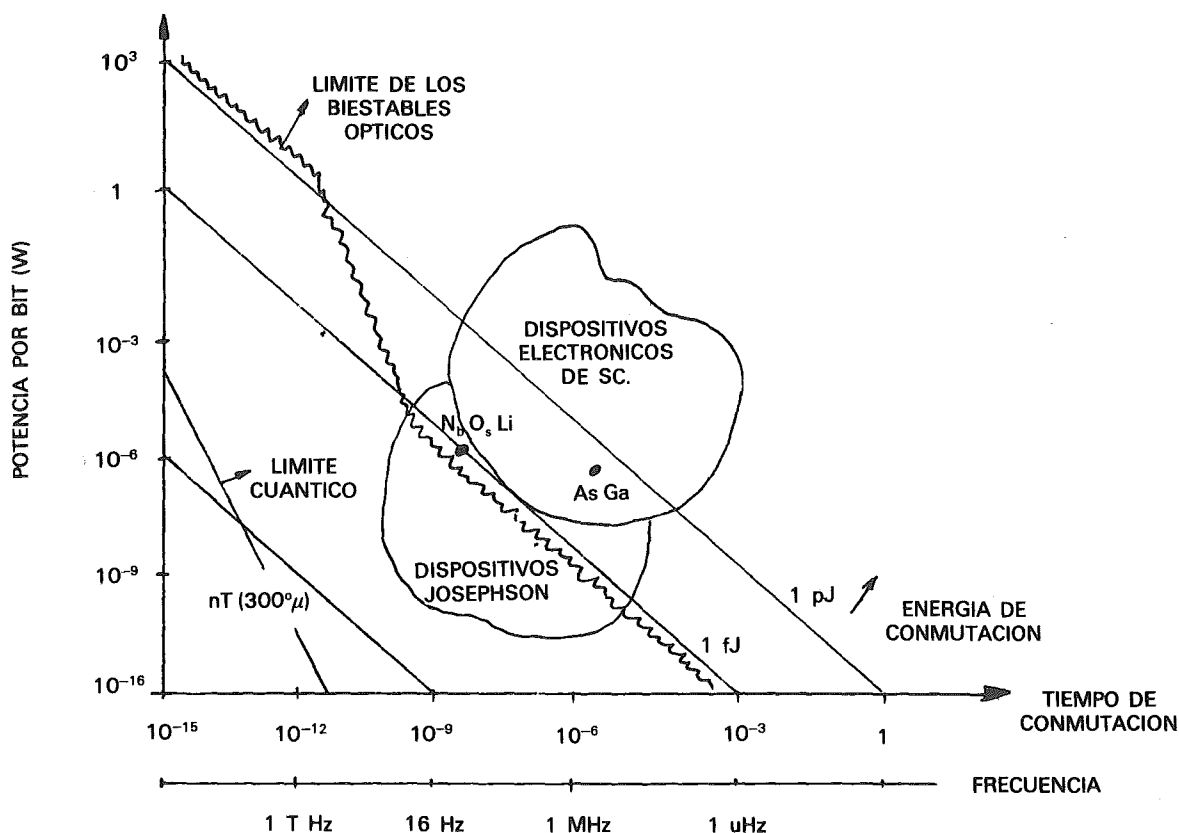


Tiempos de subida  
y de bajada  $\approx 40$  ns

Es decir, obtenemos a partir de una onda triangular un *pulso* con una forma más convencional.

d) **Comparación en cuanto al tiempo de conmutación que pueden permitir los dispositivos anteriores**

Parece ser que el límite para los dispositivos electrónicos de semiconductor en tiempo de conmutación está en  $10^{-10}$ s, y en potencia por bit  $10^{-17}$ W aproximadamente. Otros tipos de dispositivos son los Josephson (superconductores) que consiguen reducir ambos límites.

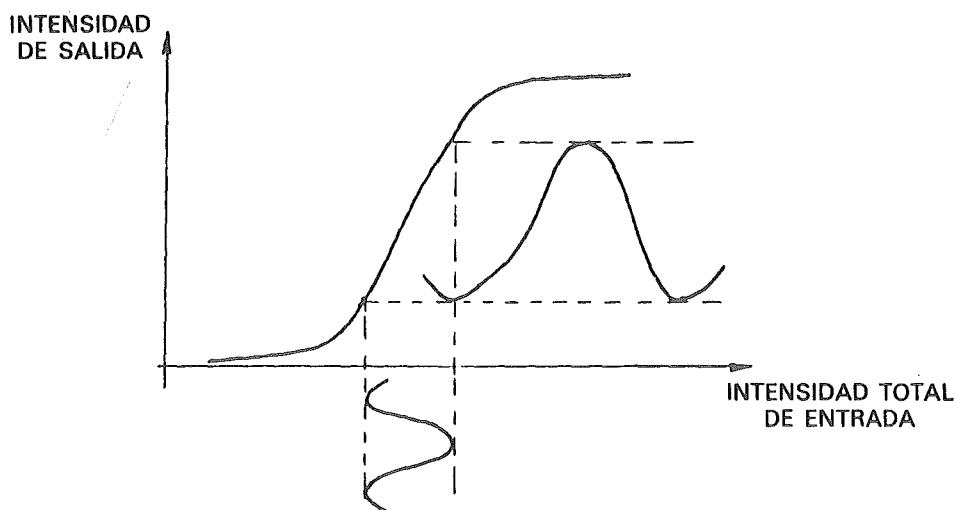


Por otro lado vemos un límite para los biestables ópticos; sin embargo, aun así, los tiempos conseguidos en conmutación son bastante inferiores a los de los biestables comunes. Siendo  $10^{-12}$  segundos un tiempo factible que da una frecuencia extraordinariamente alta, a pesar de que exige una potencia por bit de  $10^3 \text{ W}$  aproximadamente.

### e) Algunas aplicaciones

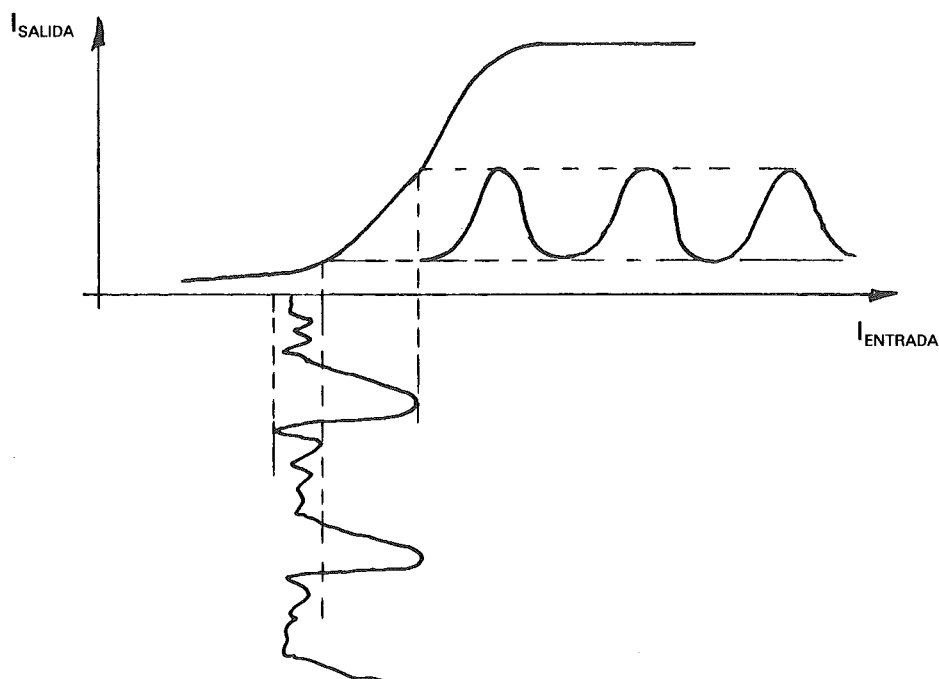
#### 1) Amplificador de imágenes ópticas

Utilizando el ciclo de histéresis de área nula;

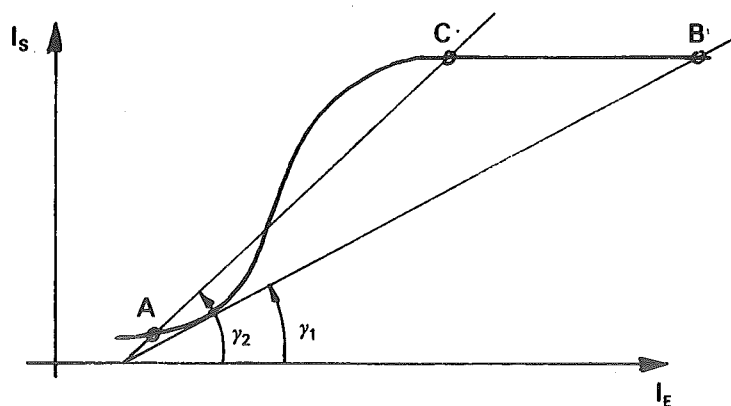


## 2) Supresor de ruido

Se trata de lo mismo pero aprovechando de forma diferente el ciclo de histéresis:



## 3) Memorias



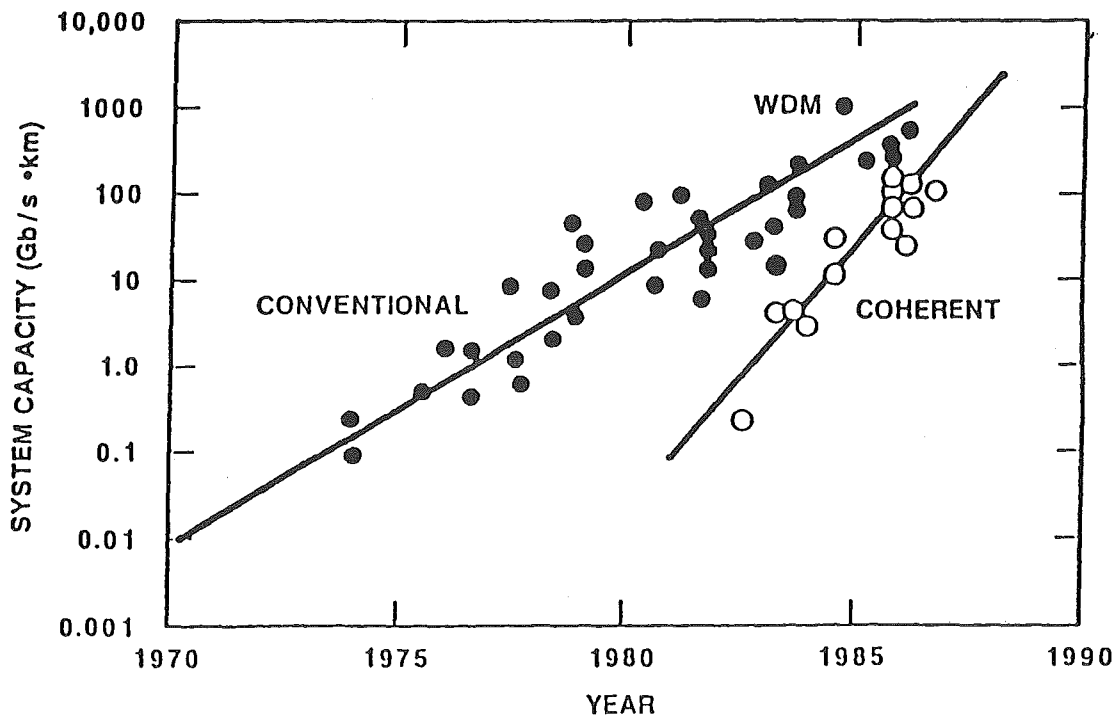
El sistema permite 2 entradas únicamente, que dan como resultado rectas con pendiente  $\gamma_1$  y  $\gamma_2$ .

Si nos encontramos en A e introducimos en el sistema un pulso lo suficientemente largo pasaremos al punto B. Aunque el pulso cese la situación final será el punto C.

## II. SISTEMAS COHERENTES

### I. INTRODUCCION

TREND IN LIGHTWAVE SYSTEMS CAPACITY

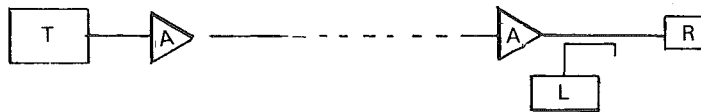


En la gráfica podemos observar que desde el principio de la década de los 80 los sistemas coherentes han alcanzado una gran capacidad. Esta en un futuro próximo será mayor a la de los sistemas convencionales.

#### A. Aplicaciones posibles de la tecnología de radiaciones de luz coherentes

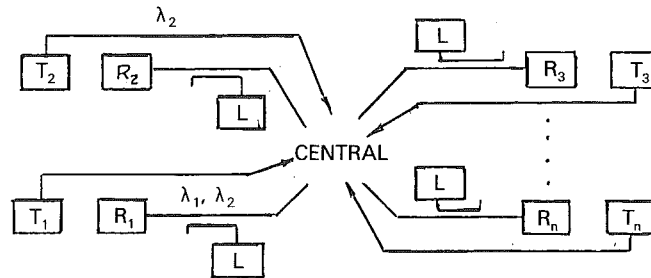
##### 1. Para sistemas submarinos

El aumento de sensibilidad contrae un aumento de distancia entre repetidores. Este fenómeno implica por tanto un abaratamiento del sistema. En estos sistemas se introduce en la fibra un amplificador lumínico. La gran ventaja reside en que se pueden cubrir largas distancias sin necesidad de incorporar muchos componentes electrónicos.



## 2. Interconexión entre oficinas: Canales múltiples de alta velocidad

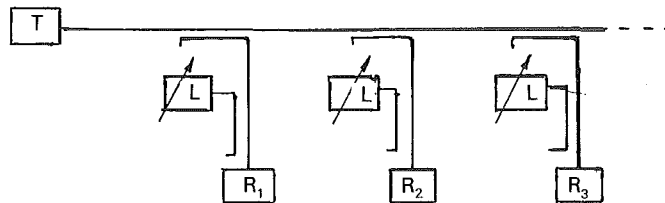
Esta aplicación reside en que cada persona tiene un receptor y un transmisor. Todos emiten o mandan su información a una central y cada receptor puede recibir la información deseada gracias a un oscilador local.



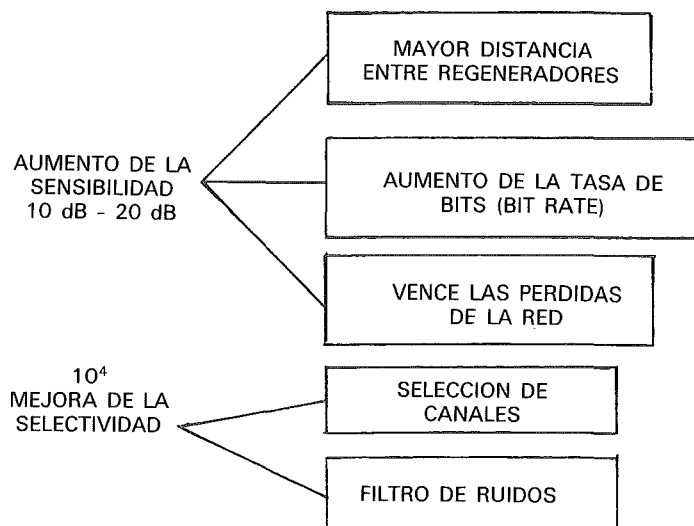
## 3. Sistemas de abonados: Canales múltiples, receptores sintonizables, partes altamente integradas

Un transmisor emite varias informaciones y cada abonado puede elegir la información deseada gracias a unos receptores sintonizables. Los osciladores locales tienen la propiedad de sintonizar la longitud de onda deseada.

Aplicaciones: Televisión de alta definición.



## B. Posibilidades que ofrecen los sistemas coherentes





### C. Ventajas de los sistemas coherentes

Los sistemas coherentes presentan dos ventajas principales:

#### 1) *Mejora de la sensibilidad*

Esta mejora contrae los siguientes puntos:

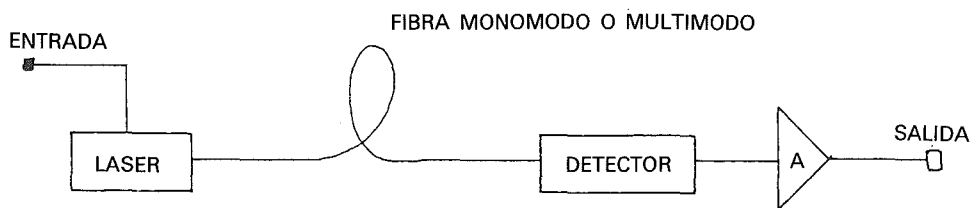
- Ganancia de conversión en la mezcla de luz.
- Elección de esquemas de modulación más eficientes.

#### 2) *Mejora de la selectividad*

- Filtrado eléctrico en el dominio de la óptica.
- Se aprovecha más eficientemente el ancho de banda.

### D. Comparación entre los sistemas coherentes y los de detección directa

#### 1. *Detección directa*



En este caso, el láser modula la señal de entrada. Esta modulación se hace en intensidad por medio de una modulación directa por inyección de corriente.

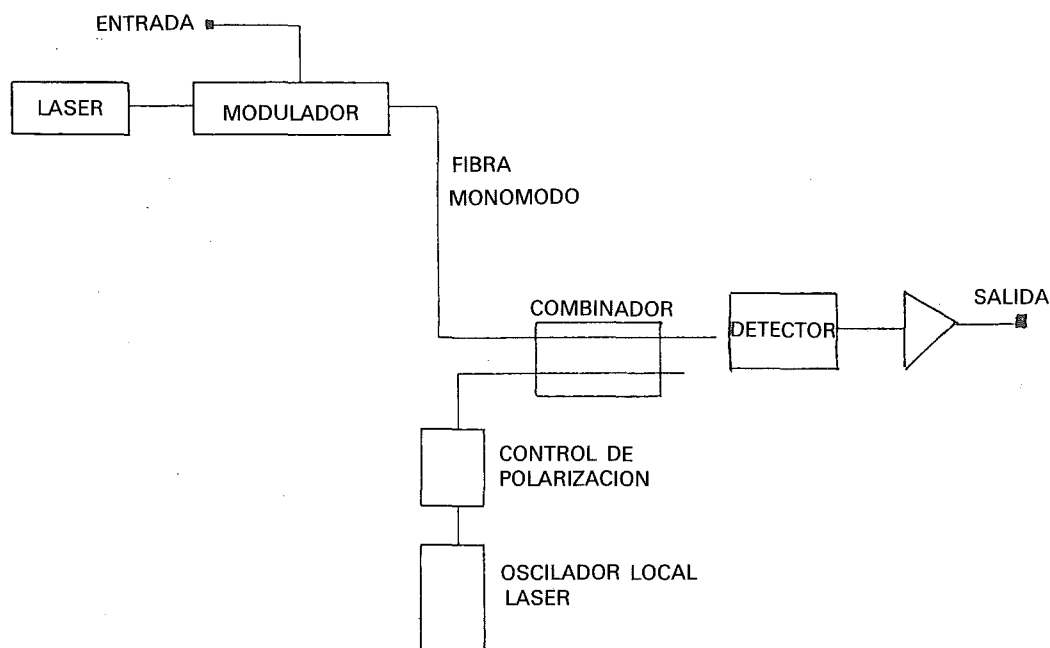
Esta señal es transmitida a través de una fibra que puede ser tanto monomodo como multimodo. El detector distingue los estados de luz o no luz creando una corriente proporcional a la potencia óptica recibida.

La señal pasa a un amplificador que tiene un ruido de entrada de 20 dB, lo que crea una relación señal-ruido mayor a la teórica.

#### 2. *Detección coherente*

El láser en este sistema debe tener una anchura de línea menor a la tasa de bits (bitrate) que es, aproximadamente, 500 GHz; en caso contrario no nos sería de utilidad porque tendríamos problemas de tipo eléctrico en el láser.

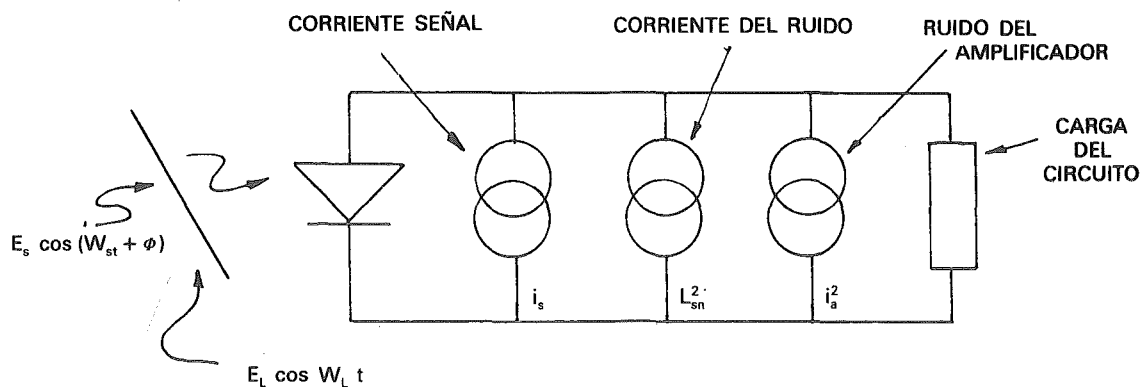
Existe, asimismo, un modulador que sirve para modular la luz del láser. Esta señal modulada en amplitud fase o frecuencia se transmitirá a través de una fibra monomodo y llegará a un combinador o “directional coupler”. En este combinador la señal se mezcla con otra señal proveniente de un oscilador local.



La señal del oscilador local es controlada en lo que a su polarización se refiere, ya que se desea que tenga la misma polarización que la de la fibra monomodo. La mezcla de las dos señales es transformada por el detector.

Hemos de destacar que la señal de la fibra monomodo tienen una parte de ruido y que al ser combinada con la del oscilador local se logrará una cierta amplificación (tanto de la señal como del ruido). Aunque después del detector el amplificador introduzca ruido, la relación señal-ruido no será importante, lo que aumenta considerablemente la fiabilidad y efectividad del sistema.

— Modelo básico de detección coherente.



En el gráfico observamos un circuito equivalente del detector.

Las señales que llegan al fotodiodo son campos eléctricos. En este caso existen dos campos eléctricos provenientes, por una parte, de la señal transmitida y, por otra parte, del oscilador local.

Si aumentamos el campo del oscilador local obtendremos las reacciones de amplificación ya señaladas anteriormente. En el circuito equivalente se distinguen tres corrientes distintas:

- Corriente de la señal.
- Corriente producida por el ruido.
- Corriente producida por el ruido del amplificador.

Matemáticamente podríamos obtener la siguiente fórmula para la fotocorriente:

$$i_t = A (E_s \cos(W_{st} + \emptyset) + E \cos W_L t)^2 + \text{Ruido}$$

Los tipos de detección pueden ser heterodinos u homodinos. La diferencia reside en que en los primeros la frecuencia de la señal  $W_s$  y la frecuencia del oscilador local son distintas, mientras que en los homodinos son iguales.

Teniendo esto en cuenta, obtenemos las siguientes fórmulas:

$$\text{Para homodinos: } t_s = A E_s E_L \cos \emptyset$$

$$\text{Para heterodinos: } t_{s2} = A E_s E_L \cos [(CW_s - W_L) t + \emptyset]$$

Se observa perfectamente en otras fórmulas que el incremento de la potencia del oscilador conlleva el aumento de  $E_L$  y, por tanto, una amplificación de la señal, pero ésta no es tan fácil de conseguir.

En ambos casos, tanto para homodinos como para heterodinos la corriente de la señal es proporcional a  $\sqrt{P_s P_L}$ , siendo  $P_s$  la potencia de la señal y  $P_L$  la potencia del oscilador local.

### 3. Relación señal-ruido

Fijémonos en la siguiente relación:

$$\begin{array}{l} \text{ruido cuadrático} \\ \text{medio total} \end{array} = \begin{array}{l} \text{ruido cuadrático} \\ \text{medio de la señal} \end{array} + \begin{array}{l} \text{ruido cuadrático} \\ \text{medio equivalente} \\ \text{del amplificador} \end{array}$$

Para sistemas de detección directa obteníamos que el ruido del amplificador aumentaba considerablemente la relación señal-ruido.

Sin embargo, en los sistemas coherentes podemos considerar que el ruido de este amplificador es despreciable. Esta propiedad nos permitirá aumentar la distancia entre repetidores, ya que el ruido de la señal es bastante pequeño. Podemos considerar que con los sistemas de detección coherente nos podemos aproximar al límite teórico de la relación señal-ruido.

## E. Tipos de modulación

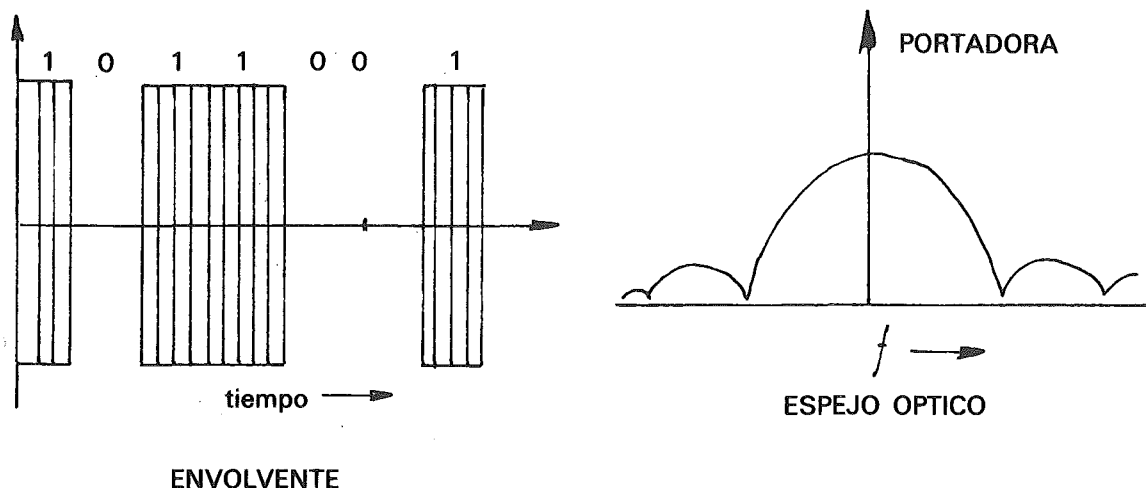
### 1. Amplitude Shift Keying (A.S.K.)

Modulación en amplitud.

Sigue la siguiente fórmula:

$$E_s = E_c \cos W_{ct} [1 + m(t)]$$

Para la transmisión digital haremos que  $m(t)$  sea 0 ó 1. De esta manera y sirviéndonos de una onda portadora como la de la figura adjunta lograremos transmitir señales digitales.



Esta modulación tiene el gran defecto de que sólo transmite la mitad de la potencia, ya que la otra mitad es gastada por la portadora.

Además, la potencia media es igual a la mitad de la potencia máxima.

## 2. *Frequency Shift Keying (F.S.K.)*

Modulación en frecuencia.

Con este método lo que se hace es transmitir con una frecuencia  $f_1$  para el "0" y con una frecuencia  $f_2$  para el "1".

Como la potencia de emisor es constante, obtenemos una envolvente constante.

Como inconveniente se puede apreciar que la diferencia de frecuencia,  $f_1 - f_2$ , debe ser mucho mayor que la tasa de bits o "bitrate".

## 3. *Phase Shift Keying (P. S. K.)*

Modulación en fase.

Sigue la siguiente ecuación:

$$E_s = E_c \cos [W_{ct} + \theta m(t)]$$

En el P. S. K. mandaremos la señal con  $\theta(t) = 0$  para transmitir un "1" y con  $\theta(t) = \pi$  para el "0".

Con este método tenemos que saber si la señal recibida está desplazada o no. Esta fórmula de modulación es la mejor en sensibilidad, pero es difícil de ponerla en práctica.

## F. Problemas en los sistemas coherentes

→ *Anchura de línea del láser*

- Transmisor.
- Oscilador local.
- Aislamiento óptico.

→ *Polarización*

Se puede solucionar de las siguientes formas:

- Con una polarización estable en la fibra.
- Controlando la polarización de control.
- Diversidad de polarización: esto es, modificando la polarización de llegada y reconvirtiendo el signo.

### 1. *Consideraciones mayores*

#### a) *Transmisores*

En el láser tendremos que resolver los siguientes problemas:

- La anchura de línea.
- La estabilización de la frecuencia del láser, ya que ésta depende mucho de la temperatura.
- El aislamiento. En la fibra se producen reflexiones y, por tanto, se debe intentar que se deje transmitir en una dirección y que se impida en la otra para no perder frecuencia.

En el modulador aparecen los siguientes defectos:

- Atenuación de moduladores externos.
- A bajas frecuencias la respuesta del láser no es buena.

#### b) *Fibra*

Supongamos resueltos los problemas de los transmisores. La fibra tiene problemas con la polarización ya que:

- Existen continuos cambios de la polarización debido a la temperatura o a razones mecánicas.
- Existen además vibraciones mecánicas.
- Existe también una dependencia de la longitud de onda con la polarización.

Cuando la potencia de transmisión pesa un cierto nivel la fibra se comporta de forma no lineal a causa de los siguientes efectos:

- S. B. S.
- Ramen cosstalk.
- 4 Wave mixing.

Estos efectos dan lugar a una dispersión no deseada.

En conclusión, debemos decir, que los sistemas coherentes necesitan fuentes coherentes.

### c) *Receptores*

En el láser u oscilador local observamos los siguientes problemas:

- La fase del ruido, debemos una anchura de línea del oscilador local lo más estrecha posible.
- Exceso de intensidad del ruido.
- Se quiere una gran potencia de salida, pero es difícil de conseguir ya que aparece un ruido extra en el láser.
- Aislamiento, ya que es muy sensible a los reflejos.

En el detector y en el preamplificador aparece un ruido de conexión y además se busca obtener un ancho de banda amplio.

En el sistema de control aparecen tres problemas distintos:

- Para sistemas heterodinos lo que se debe intentar es controlar la frecuencia.
- Para sistemas homodinos se debe conseguir un control de fase ya que tienen la misma frecuencia.
- Además se necesita un control de polarización para igualar la polarización del oscilador local y la de la señal de llegada.

## II. CARACTERISTICAS DE LOS COMPONENTES

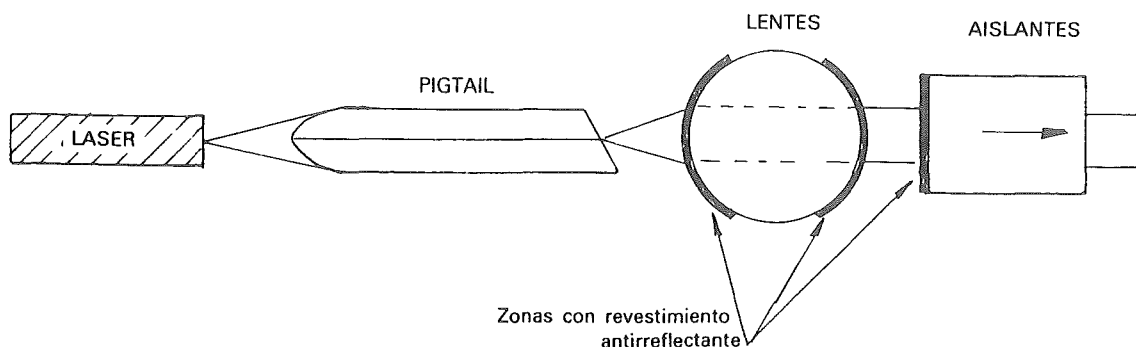
### A. Aislamiento óptico

El objetivo de este sistema de aislamiento óptico es que las reflexiones estén por debajo de 60 dB.

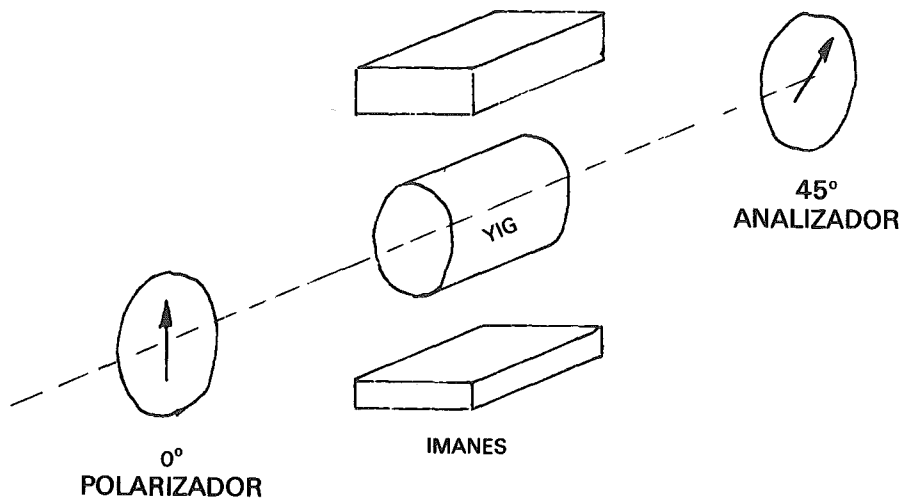
Estas reflexiones ocurren en:

- Ambas partes de la fibra o “pgtail”.
- Ambas superficies de las lentes.
- La superficie del aislante.

Para impedir la reflexión se recubren estas superficies con revestimientos antirreflectantes.

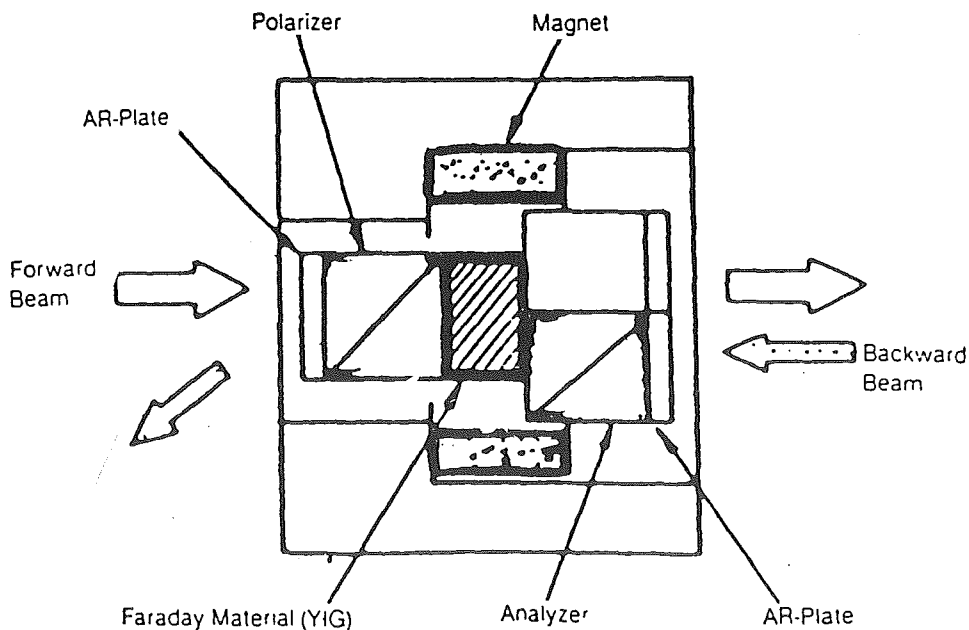


— Expliquemos el funcionamiento del aislante.



Podemos observar en el gráfico adjunto que se compone de un material magnético controlado por dos imanes y por dos polarizadores de distinto ángulo.

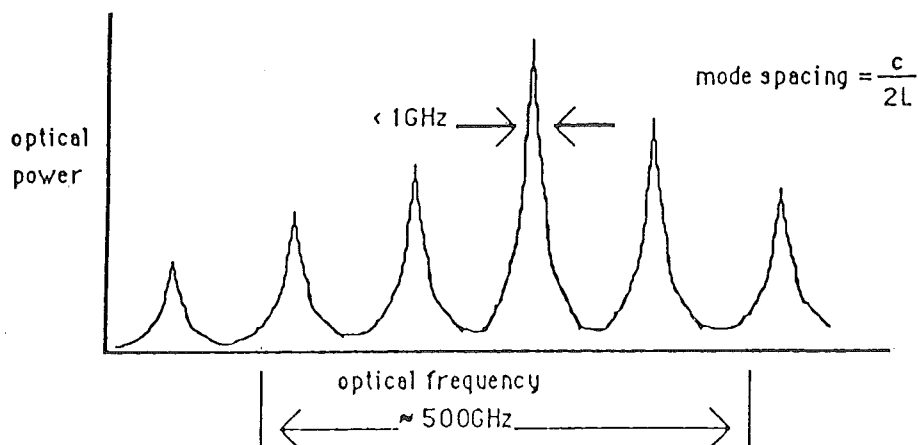
Cuando una onda reflejada quiere volver pasa por un analizador de  $45^\circ$  y, por lo tanto, cuando quiere pasar por el polarizador de  $0^\circ$  la onda es desviada y se pierde porque no tiene la polarización permitida.



## B. Láseres

En el espectro de un semiconductor de un láser de semiconductor vemos que el ancho de banda es de 500 GHz. Lo que debe intentar conseguir es que la anchura de línea no sea superior a 1 GHz.

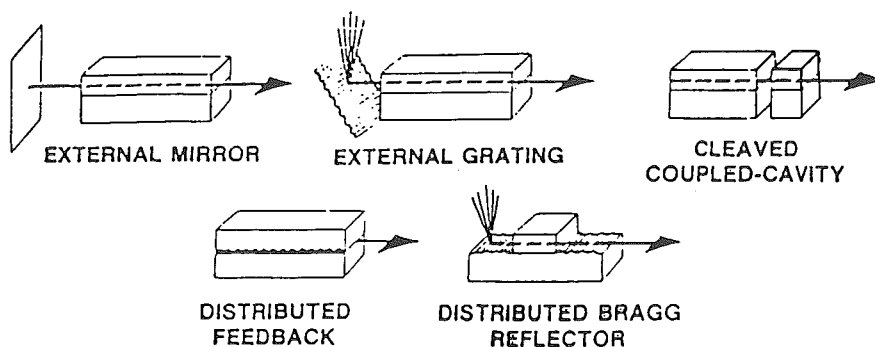
## SPECTRUM OF FABRY-PEROT SEMICONDUCTOR LASER



Para conseguir que la anchura de línea no supere los 1 GHz se pueden introducir dispersivos.

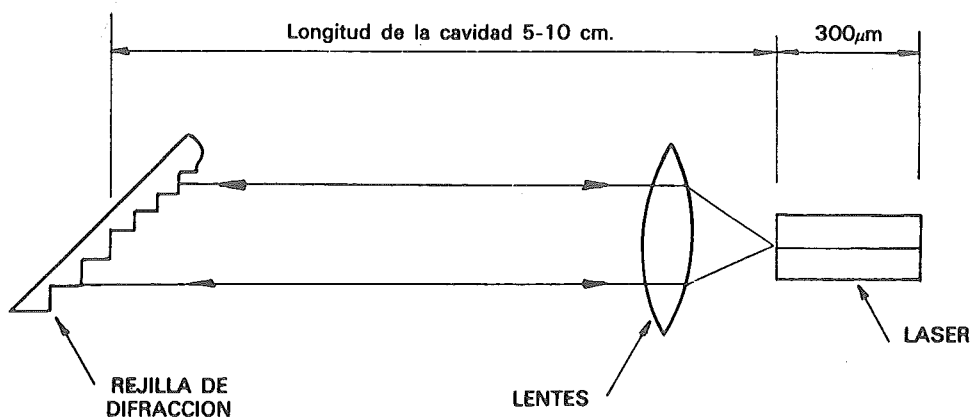
Un ejemplo de estos elementos son los láseres de un único modo que aquí presentamos.

## SINGLE LONGITUDINAL MODE LASERS



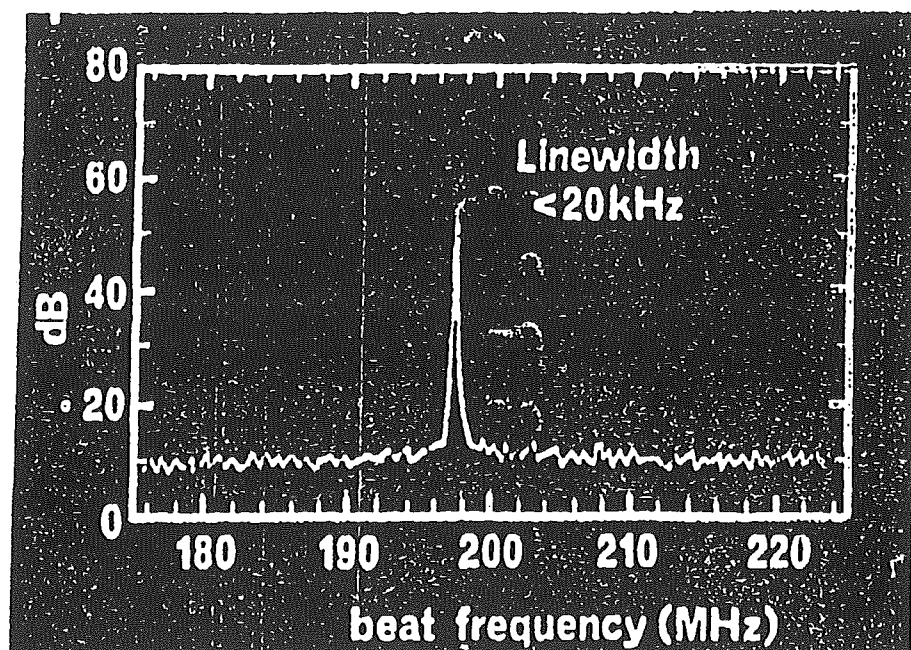
Otro medio para conseguir anchura de línea estrecha es por medio de una cavidad externa en un láser semiconductor.

Al girar la rejilla se consigue una anchura de línea estrecha.



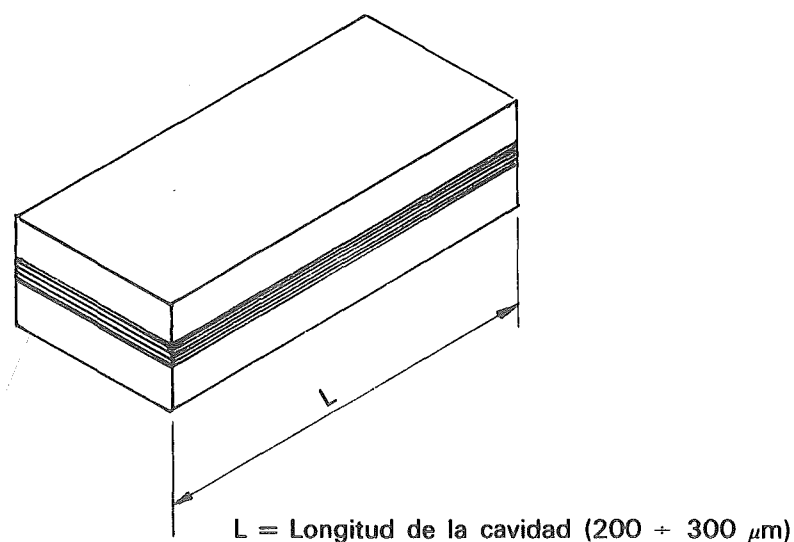


## MEASURED SPECTRUM OF LEC LASER



Como podemos observar en el gráfico, con este método la anchura de línea se reduce por debajo de los 20 KHz. Sin embargo, existe un problema de inestabilidad, por tanto este método sólo se aplicará en experimentos de laboratorio.

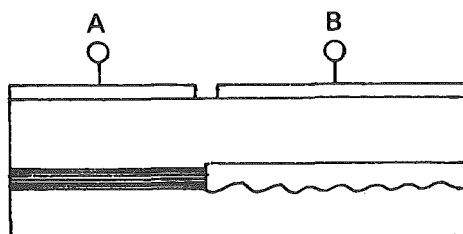
Otro método de conseguir anchuras de línea pequeña es por métodos internos. Utilizando los DFB, podemos conseguir ese efecto.



Aumentando la longitud de la cavidad se reduce el ancho de línea, pero reduce el espacio entre modo, aumentando el número de modos, lo que no es interesante.

Los DFB no son tan selectivos en frecuencia como los de cavidad externa, pero son mejores que los de Fabry-Perot.

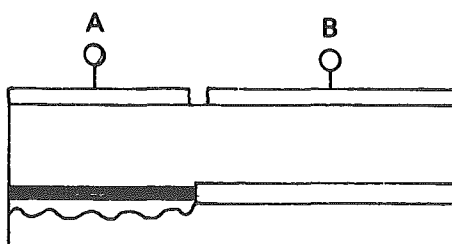
Los japoneses hacen una combinación de varios elementos en una pieza de semiconductor.



SOLUCION A

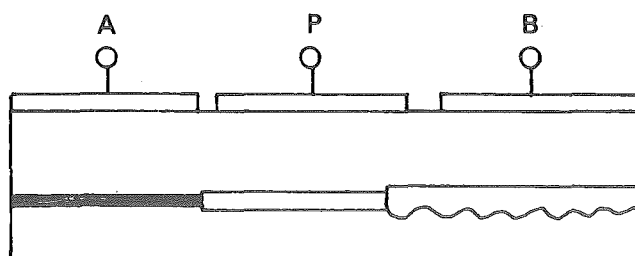
La cavidad negra no es selectiva en frecuencia, se crea luz si hay corriente en A.

La inyección de corriente en B trae portadores de carga que cambian el índice de refracción. Se genera luz selectiva, en cuanto a frecuencia esa selección se hace en la zona ondulada.



SOLUCION B

Las zonas negras y onduladas son análogas a la anterior solución, pero en esta solución se añade una zona pasiva. La corriente inyectada por el polo P provoca una reacción similar a la del aumento de longitud en los DFB.

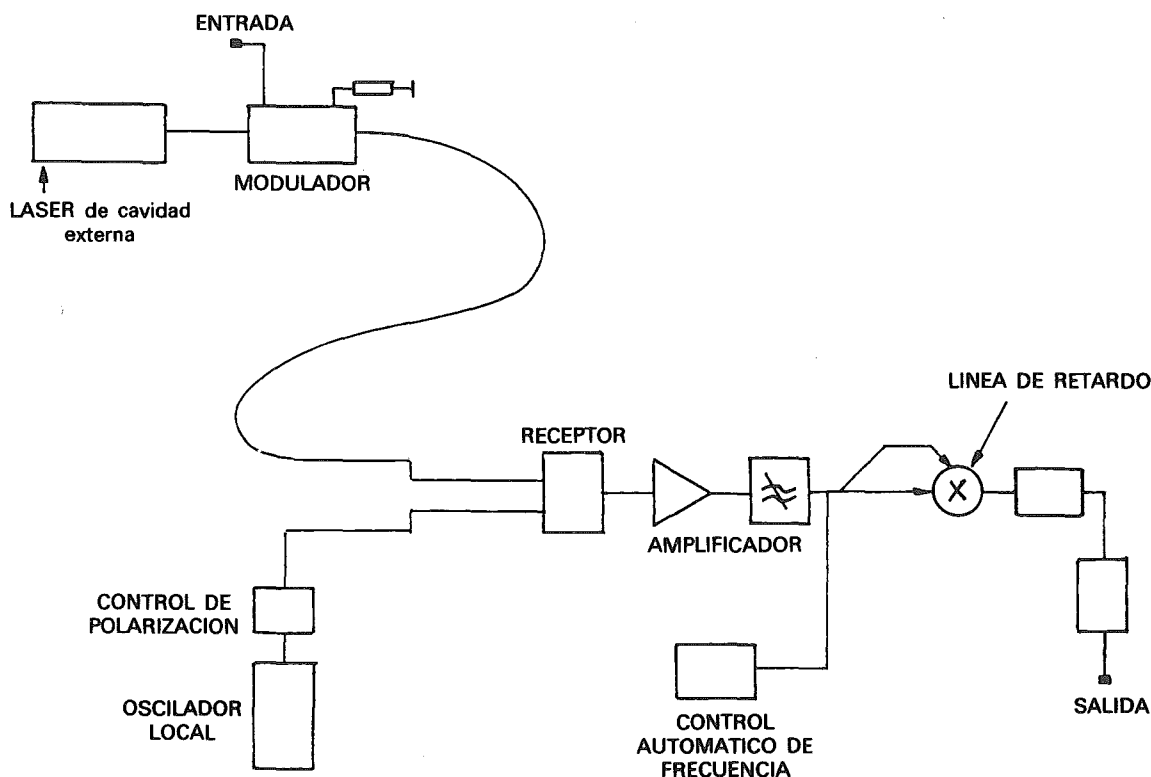


SOLUCION C

Esta solución es igual a la anterior, pero la zona pasiva en la mitad permite evitar los problemas de reflexiones.

### III. SISTEMAS EXPERIMENTALES

#### A. Sistema experimental de modulación en diferencia de fase



Antes de transmitir la información se modulan dos fases correspondientes a dos tiempos consecutivos, haciendo que los "0" se transmitan sin cambio de fase y que los "1" se transmitan con un cambio de fase.

Una vez transmitida la información ésta se recibe en el receptor con dos detectores equilibrados, este receptor sirve para eliminar los ruidos producidos por el oscilador local.

Existe un controlador automático de frecuencia que sirve para controlar la frecuencia del oscilador local.

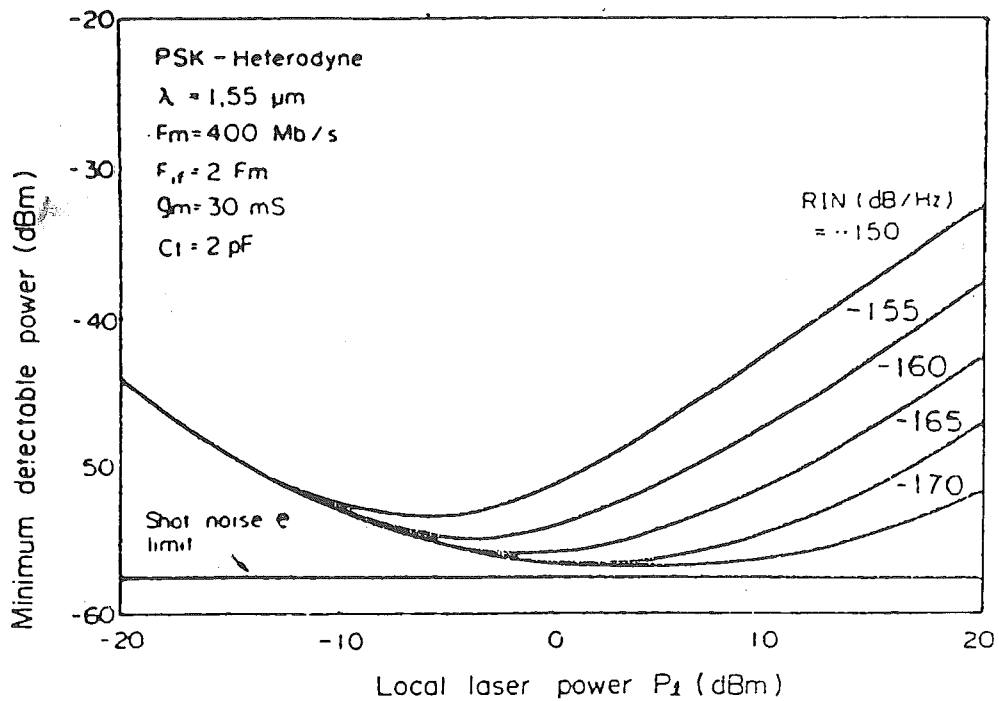
La línea de retardo permite conseguir un retraso de la señal recibida. Lo que se hará al final es comparar las fases de dos tiempos consecutivos y si hay cambio de fase será un "1" y si no lo hay será un "0".

#### B. Diagrama de sensibilidad de potencia

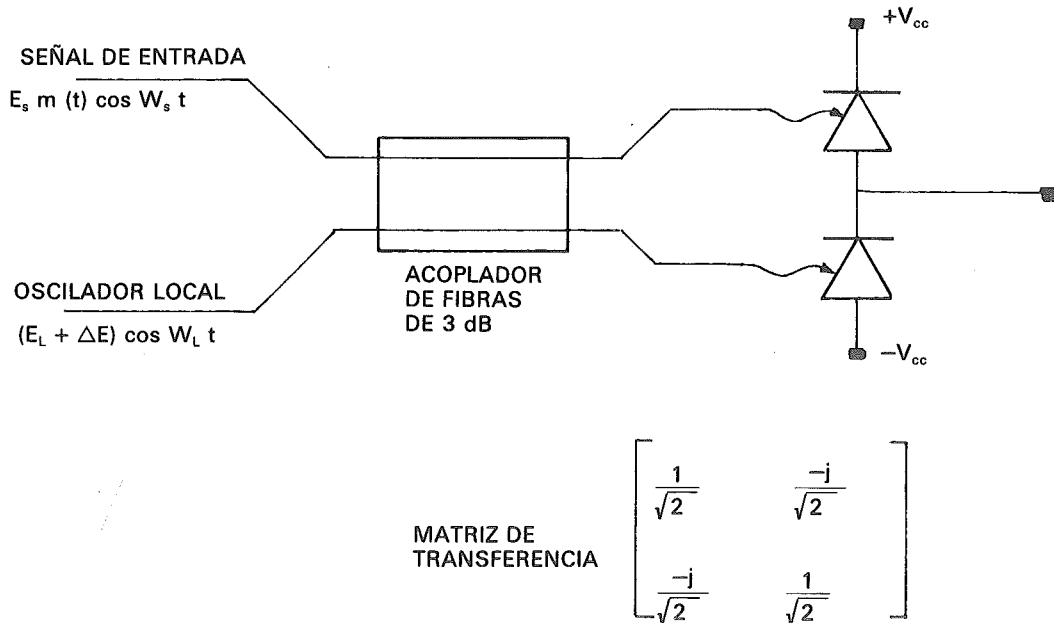
Se ve claramente en la gráfica que la mínima potencia detectable aumenta con la potencia del oscilador local.

Pero, existen problemas ya que al aumentar la potencia del oscilador local aumenta el ruido del oscilador local.

En la gráfica siguiente presentamos la gráfica de la potencia mínima detectable en función de la potencia del oscilador local.



Una forma de deshacernos del ruido adicional es mediante un receptor óptico balanceado o equilibrado.



La señal de entrada debe ser débil.

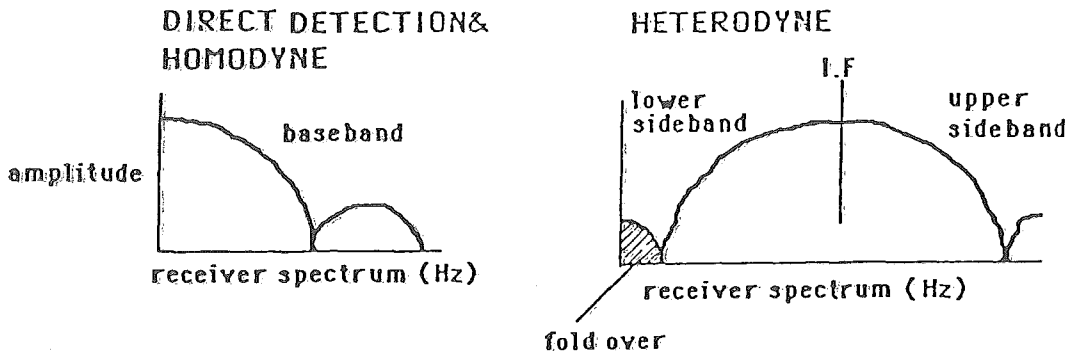
El efecto del acoplador de la gráfica es el siguiente:

La energía de entrada se divide en dos componentes iguales, pero desfasados 180°, de esa manera desaparece la contribución del ruido.

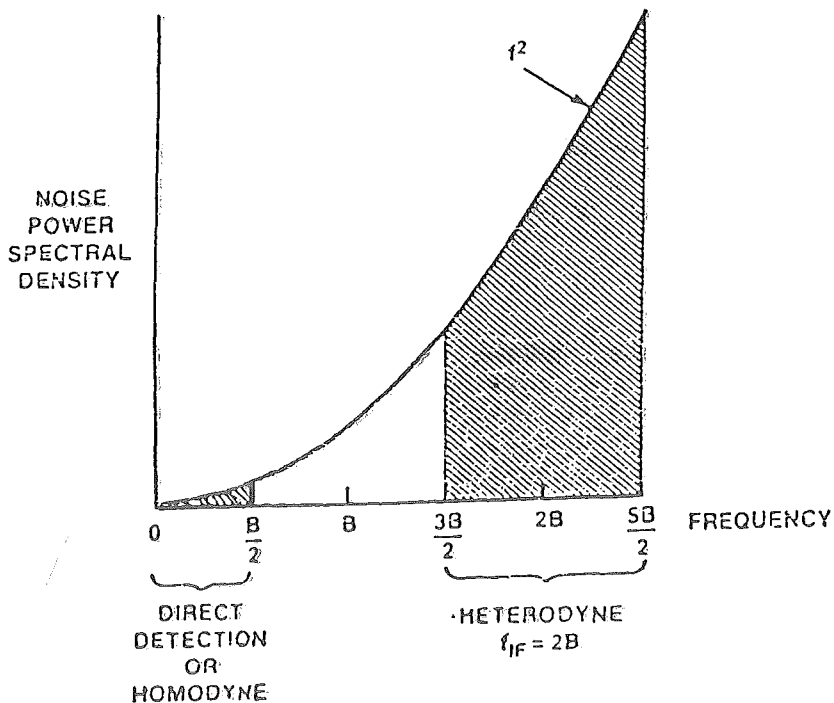
### C. Transmisión de datos a alta frecuencia

El problema de esta transmisión coherente reside en el siguiente punto:

Los receptores de detección directa deben tener un ancho de banda de recepción entre el 50 y el 100 % de la frecuencia del reloj, pero en los receptores heterodinos se puede necesitar del 200 al 300 % de la frecuencia de reloj.



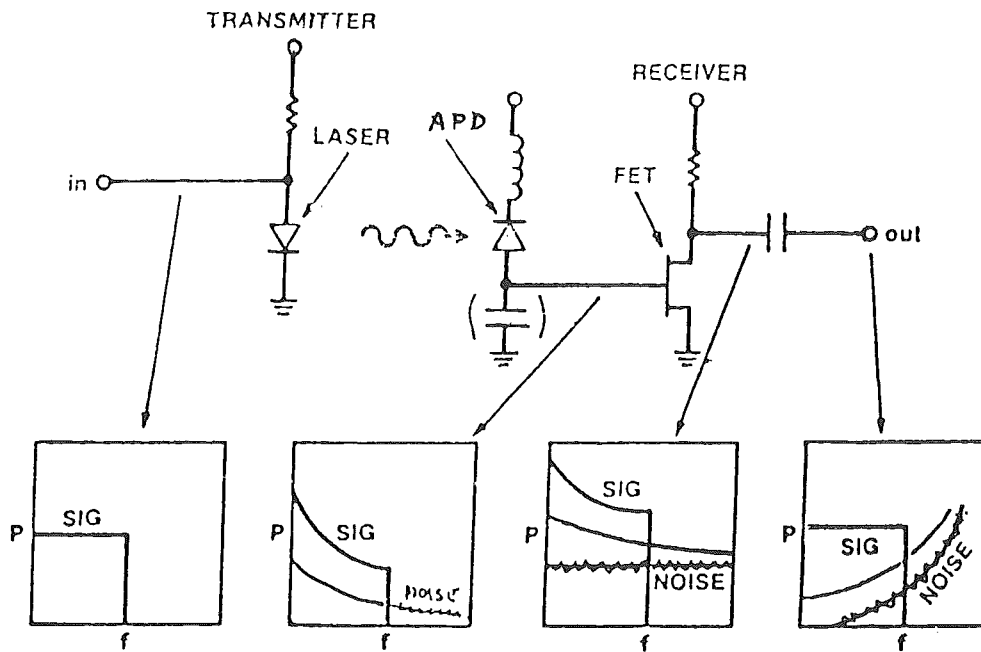
En esta gráfica que presentamos a continuación observamos la existencia de otro problema.



Podemos apreciar en la gráfica que la densidad espectral de potencia del ruido es proporcional al cuadrado de la frecuencia.

Para frecuencias bajas esto no contrae ningún problema, éste es el caso de los detectores directos o los homodinos, pero en el caso de altas frecuencias el ruido aumentaría demasiado. Por esta razón se crea un problema en los sistemas heterodinos.

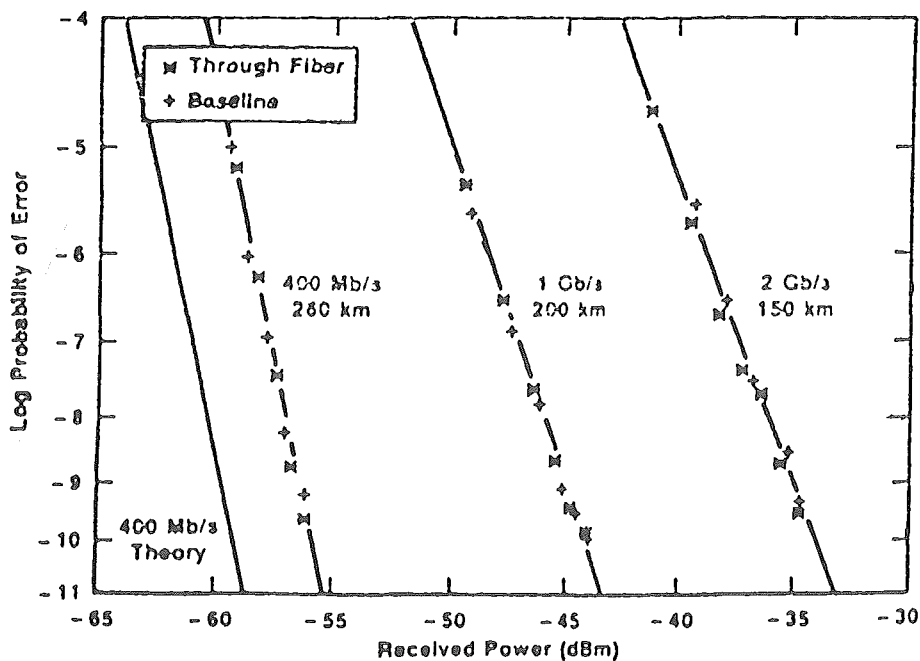
Pongamos un ejemplo:



En este ejemplo vemos una señal de entrada que al ser convertida en luz y transmitida tendrá un cierto ruido.

El fotodiodo de avalancha tiene una capacidad que integra la señal. Esta señal es seguidamente amplificada y finalmente diferenciada. En la señal de salida se observa que el ruido aumenta con el cuadrado de la frecuencia.

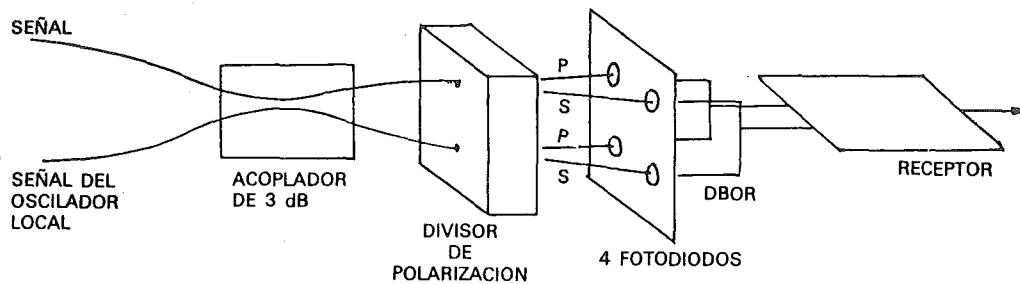
En la siguiente gráfica se explica que al aumentar el "bitrate", la sensibilidad se separa de su límite teórico. La línea en trazo continuo corresponde al límite teórico mientras que los otros trazos corresponden a distintos "bitrate".



Las soluciones propuestas para sistemas heterodinos son:

- Receptor de anchura de banda muy grande.
- Modulación espectral eficiente.

#### D. Diversidad de polarización: receptor



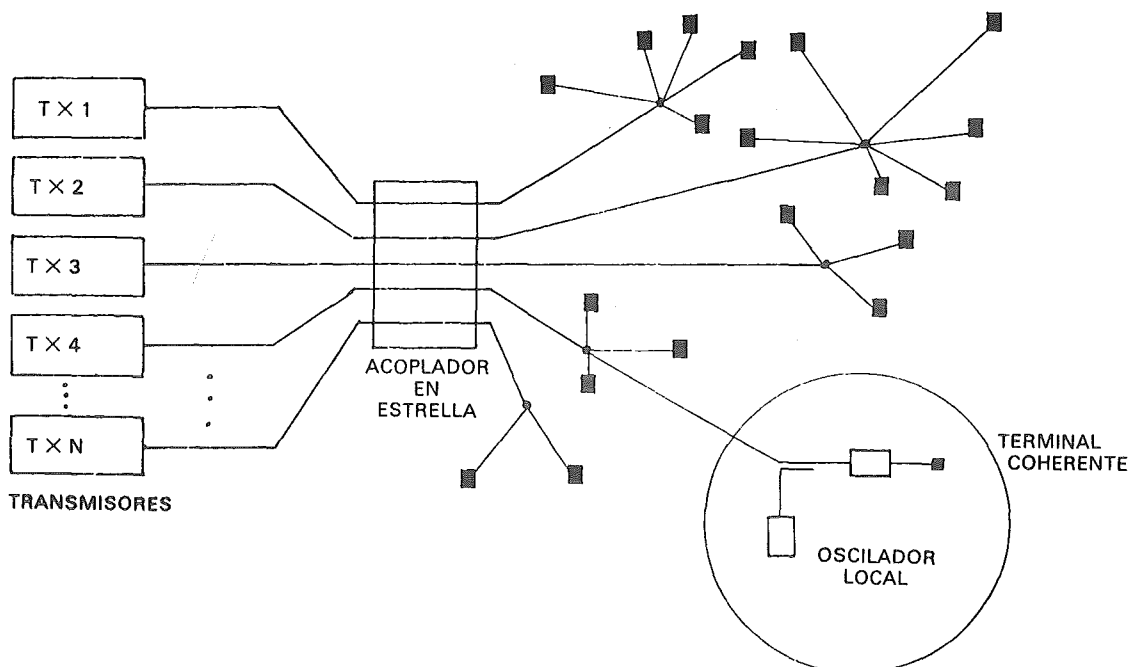
Después de pasar por el acoplador las señales pasan por el divisor de polarización que, como su propio nombre indica, separan la luz en dos polarizaciones distintas que son recogidas posteriormente por 4 fotodiodos. Estos fotodiodos transforman las señales en corrientes eléctricas.

Si uno de los canales de polarización no tiene señal se amplificaría sólo el ruido.

### IV. APLICACIONES DE LOS SISTEMAS COHERENTES

#### A. Esquema de distribución de banda ancha coherente

Esta es una de las aplicaciones más prometedoras.







Como no se pueden multiplexar en tiempo todas las señales de T.V. en una línea de abonado, ya que el bitrate sería excesivo, se necesita un mecanismo de selección en la oficina central, lo que implica un conmutador de banda ancha.

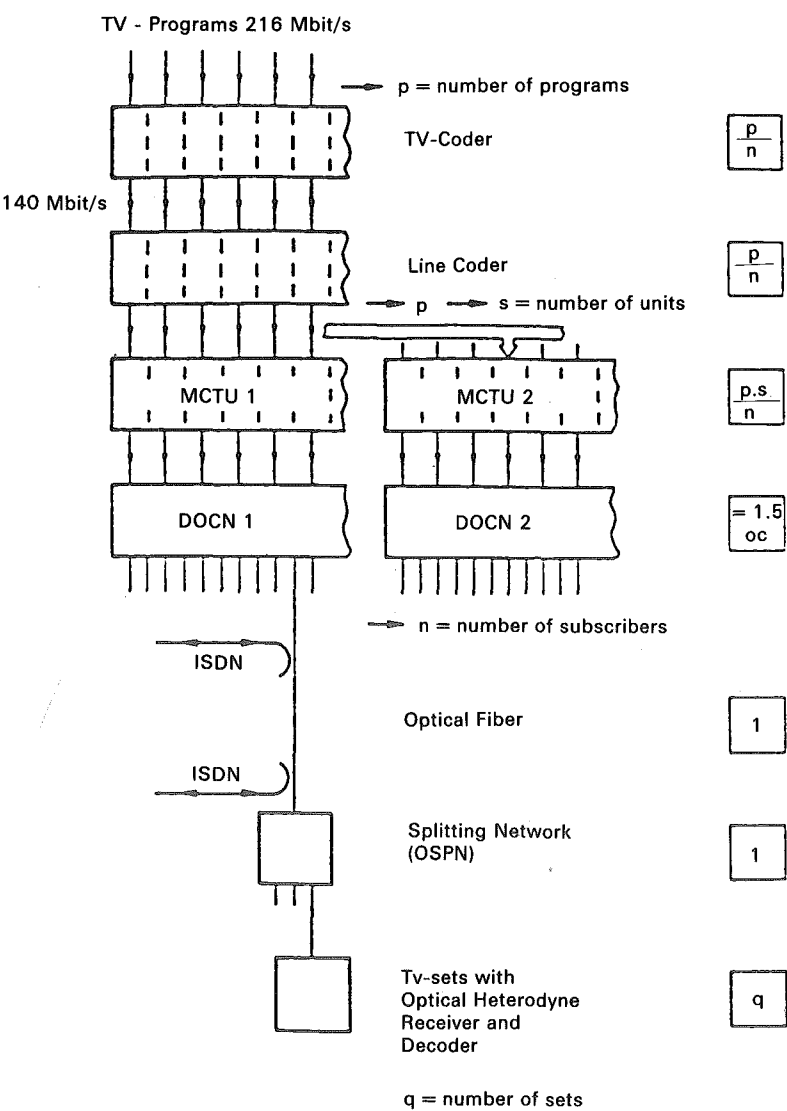
Finalmente se multiplexan una serie de señales de T.V., hasta llegar a un bitrate de 560 Mbit/s.

Ahora vamos a comparar el sistema anterior con un sistema coherente que realiza la misma función.

En primer lugar observamos que en este caso no hay conmutación de banda ancha.

Simplemente hay que poner cada canal en el transmisor y enviarlos a través de la línea de abonado hasta el abonado.

Un transmisor puede ser compartido hasta por 2.000 abonados, por lo que puede que los sistemas coherentes lleguen a ser un sistema muy flexible y relativamente barato, aunque en la actualidad estos sistemas todavía no han salido del laboratorio.



### C. Ejemplo de una red local coherente multi-canal

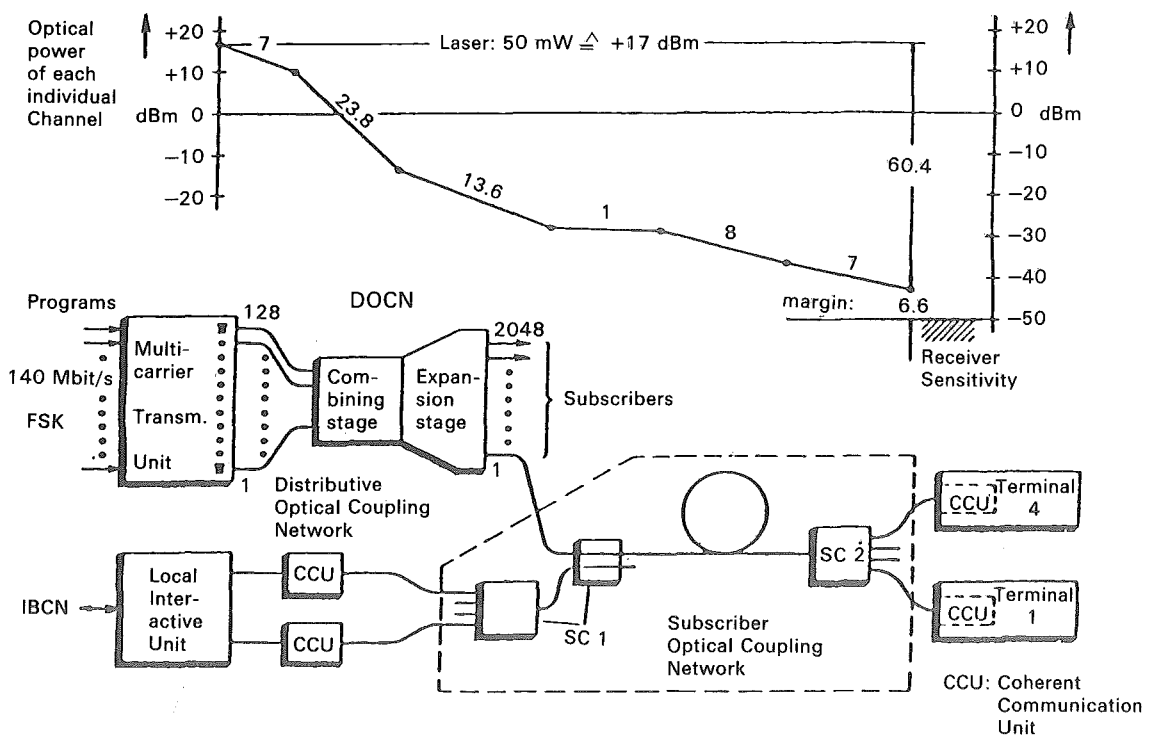
En el gráfico tenemos el esquema de un sistema coherente multi-canal con un determinado número de corrientes de 140 Mbit/s, que serán combinadas y expandidas, para después ser transmitidas hacia un gran número de usuarios, donde en la etapa final tiene lugar la mezcla y detección.

En el diagrama de la parte superior del gráfico se muestran las pérdidas a lo largo de todo el sistema.

Comenzamos con unos láseres transmitiendo una potencia de  $50 \text{ mW} = 17 \text{ dBm}$ , que es una potencia alta, pero razonable.

Después vemos cómo la potencia baja debido a las pérdidas en combinar y dividir la señal para 2.000 abonados, también hay pérdidas en la línea, en los aparatos de acoplamiento y mezcla, etc.

Con todas esas pérdidas nos queda un margen de 6 dB con un B.E.R. (bit error rate) de  $10^{-9}$ , por lo que el sistema funcionará de un modo muy fiable.



Example of a CMC Local Network.

### V. CONCLUSIONES

- En los sistemas coherentes se están acercando a la madurez.

Esto se debe a que los problemas son mejor entendidos, los componentes están mejorando continuamente gracias a la cooperación entre los diseñadores de componentes y

los de sistemas y como consecuencia se están haciendo posibles los sistemas coherentes bien diseñados.

- Los sistemas coherentes ofrecen oportunidades muy interesantes para la distribución de T.V. y T.V. de alta definición en redes de abonados. Las redes de abonados serán las que harán que todo el trabajo en sistemas ópticos de los últimos 15 años haya merecido la pena.